



**Ana Rita Bernardo de  
Oliveira**

**Avaliação do efeito do ozono troposférico na vinha  
duriense**





**Ana Rita Bernardo de  
Oliveira**

**Avaliação do efeito do ozono troposférico na vinha  
duriense**

Dissertação apresentada à Universidade de Aveiro para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia do Ambiente, realizada sob a orientação científica da Doutora Ana Isabel Miranda, Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Trabalho desenvolvido no âmbito do projeto DOUROZONE (PTDC/AAG-MAA/3335/2014; POCI-01-0145-FEDER-016778) financiado por fundos nacionais pela FCT/MEC e cofinanciado pelo FEDER sob o acordo de parceria PT2020.



universidade de aveiro  
departamento de ambiente  
e ordenamento



## **o júri**

presidente

Doutora Maria Helena Gomes de Almeida Gonçalves Nadais  
Professora Auxiliar do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

orientadora

Doutora Ana Isabel Couto Neto da Silva Miranda  
Professora Catedrática do Departamento de Ambiente e Ordenamento da Universidade de Aveiro

Arguente

Doutor Nelson Augusto de Azevedo Barros  
Professor Associado da Faculdade de Ciência e Tecnologia da Universidade Fernando Pessoa



## **agradecimentos**

Agradeço, em primeiro lugar, à Professora Ana Isabel Miranda pela sua disponibilidade e orientação, assim como à Ana Ascenso que me ajudou nesta etapa. A toda a equipa Dourozone. Muito obrigada!

À minha Mãe por ser o meu modelo de coragem e o meu maior incentivo. Ao meu Pai, que embora longe, nunca deixou de me apoiar incondicionalmente. À minha família. Obrigada pela paciência inesgotável que tiveram.

Aos meus amigos, sem exceção, que estiveram sempre ao meu lado e provaram que este percurso se faz melhor com companhia. Obrigada a todos!





## palavras-chave

ozono troposférico, vinha, Região Demarcada do Douro, modelação, monitorização do ozono, AOT40

## Resumo

Diversos estudos apontam que ozono troposférico ( $O_3$ ) danifica de forma irreversível a vegetação. É amplamente aceite que a exposição das culturas ao ozono resulta em plantas subdesenvolvidas, produtos de qualidade inferior e produções mais baixas

A produção de vinho em Portugal é uma atividade económica de elevada importância, destacando-se a Região Demarcada do Douro (RDD) onde se produz o famoso Vinho do Porto, responsável por mais de 60% do valor total das exportações nacionais de vinho. Esta região é caracterizada por verões quentes, associados a elevados níveis de ozono no ar ambiente. No contexto atual de alteração climática, verificam-se condições meteorológicas mais quentes e secas, que poderão contribuir para uma maior produção de  $O_3$ .

Atendendo aos potenciais impactos negativos da exposição da vinha, esta dissertação tem como objetivo avaliar o risco de exposição ao ozono das vinhas da RDD, em clima atual e futuro, estimando as concentrações de ozono no vale do Douro e avaliando os potenciais prejuízos em termos de produtividade.

Com base na seleção de três séries temporais distintas, clima presente (2003, 2004, 2005), clima futuro médio (2049, 2064) e clima futuro longo (2096, 2097), estimaram-se as concentrações de ozono em toda a área da RDD com recurso ao modelo de transporte químico CHIMERE.

Após a validação e tratamento dos resultados, calculou-se o indicador de exposição AOT40 (concentração acumulada de ozono acima de  $1800 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h, entre os meses de maio e julho, e as funções exposição-resposta para estabelecer o risco de exposição das vinhas ao ozono.

Como principais resultados, no que se refere ao risco de exposição da vinha durante ao ozono, o valor-alvo para a proteção da vegetação foi excedido em grande parte da região do Douro, em cenário de clima presente, futuro médio e longo prazo. A aplicação das funções exposição-resposta sugerem que o ozono pode estar a potenciar uma diminuição da produtividade das vinhas da RDD.

Conclui-se, por fim, que os níveis de ozono troposférico na região podem estar a afetar a vinha e, consequentemente, comprometer a produtividade e qualidade do vinho.



**keywords**

tropospheric ozone, vineyards, Douro Region, modeling, ozone monitoring, AOT40

**Abstract**

Several studies indicate that tropospheric ozone ( $O_3$ ) irreversibly damages vegetation. It is widely accepted that crop exposure to ozone results in underdeveloped plants, lower quality and reduced productivity.

In Portugal wine production is an important economic activity, highlighted Douro Demarcated Region (RDD) where the famous Port Wine is produced and responsible for more than 60% of the total value of national wine exports.

The Douro Valley is characterised by hot summers associated with high levels of ozone, in the context of climate change, warmer and drier weather conditions can contribute to a higher production of  $O_3$ .

Given the potential negative impacts of vineyard exposure, this thesis aims to assess the ozone risks exposures to RDD vines in current and future climate, estimating concentrations of ozone in the Douro Valley and assessing potential productivity losses.

Based on the selection of three different time series, present climate (2003, 2004, 2005), middle future climate (2049, 2064) and long future climate (2096, 2097), the ozone concentrations in the entire RDD area were estimated using the chemical transport model CHIMERE. After validation and result analyses, exposure indicator AOT40 (accumulated zone exposure above of  $80 \mu g/m^3$ ) was calculated between May and July, then the exposure-response function was applied to establish the vine risk to ozone exposure.

The target value for the protection of vegetation was exceeded on the majority of the Douro region area for all the scenarios.

The exposure-response function suggest that ozone may be potentiating a decrease in the productivity of the RDD vines.

In conclusion, the tropospheric ozone levels in, Douro Valley, may be affecting the vineyard and, consequently, compromise the productivity and quality of the wine.



# Índice

<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>iii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>v</b>
<b>Lista de abreviaturas e símbolos.....</b>	<b>vii</b>
<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Região Demarcada do Douro.....	1
1.2. Ozono .....	6
1.3. Objetivo .....	8
<b>2. Efeito do ozono troposférico na vegetação.....</b>	<b>11</b>
2.1. Modo de ação e resposta da planta .....	12
2.2. Índices de exposição e nível crítico.....	15
2.3. Estudos da avaliação da exposição .....	20
<b>3. Metodologia .....</b>	<b>25</b>
3.1. Modelação .....	25
3.2. Descrição do trabalho experimental.....	28
<b>4. Resultados obtidos e discussão .....</b>	<b>31</b>
4.1. Cumprimento legal na Região Demarcada do Douro .....	31
4.2. Variação anual do O <sub>3</sub> na Região Demarcada do Douro .....	32
4.2.1. Baixo Corgo .....	33
4.2.2. Cima Corgo .....	37
4.2.3. Douro Superior.....	40
4.2.4. Síntese.....	44
4.3. Verão 2017 na Região Demarcada do Douro .....	45
4.4. Ozono e alterações climáticas no Região Demarcada do Douro .....	48
4.5. Efeito do ozono troposférico na Região Demarcada do Douro .....	50
<b>5. Conclusão e trabalho futuro .....</b>	<b>53</b>
<b>Referências.....</b>	<b>55</b>



# Lista de Figuras

<b>Figura 1.1-</b> Sub-regiões da Região Demarcada do Douro e respetiva topografia (Jones, 2013).	2
<b>Figura 1.2 -</b> Temperaturas médias anuais na Região Demarcada do Douro durante 1950-2000 (Jones, 2013).	3
<b>Figura 1.3-</b> Precipitação anual para Região Demarcada do Douro durante 1950-2000 (Jones, 2013).	4
<b>Figura 1.4 -</b> Representação esquemática das interações clima-vegetação-alterações climáticas(adaptado de (Fuhrer, 2009)).	7
<b>Figura 1.5-</b> Representação esquemática da metodologia seguida no presente trabalho.	9
<b>Figura 2.1-</b> Processo de deposição sec. (Valinhas, 2000).	13
<b>Figura 2.2-</b> Representação esquemática dos mecanismos de exclusão e tolerância ao O <sub>3</sub> (Lopes,2013).	15
<b>Figura 2.3-</b> Variação entre o indicador AOT40 (superior) e PODy (inferior) calculados por comparação dos dois indicadores ao longo do ano com a estação de crescimento (Anav et al., 2016).	18
<b>Figura 2.4-</b> Relação entre a produtividade da vinha e a exposição ao ozono (AOT40) entre junho e setembro, durante 3 anos (Soja et al., 2004).	21
<b>Figura 2.5-</b> Relação entre a produção de açúcar e a exposição ao ozono (AOT40) entre junho e setembro, durante 3 anos (Soja et al., 2004).	22
<b>Figura 2.6-</b> Sintomas visíveis característicos do efeito do ozono em folhas de videira (Krupa et al., 2001).	22
<b>Figura 3.1-</b> Esquema do sistema de modelos WRF-CHIMERE.	25
<b>Figura 3.2-</b> Domínios de modelo usados na implementação regional da WRF com resoluções de 81 (D1), 27 (D2) e 9 (D3) km <sup>2</sup> (Blanco-Ward et al., 2017).	27
<b>Figura 4.1-</b> Concentração de ozono em AOT40 (µg/m <sup>3</sup> ) h de 2003 a 2005, calculada para a RDD (Domínio 4, a 1x1 km <sup>2</sup> ).	31
<b>Figura 4.2-</b> Localização das quintas na Região Demarcada do Douro.	32
<b>Figura 4.3-</b> Médias mensais da temperatura registados na estação de Cambres para os anos 2003,2004 e 2005.	33
<b>Figura 4.4-</b> Valores de concentração mensal de O <sub>3</sub> obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta da Pacheca Baixo Corgo.	35
<b>Figura 4.5-</b> Valores de concentração mensal de O <sub>3</sub> obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta Santa Eufémia, Baixo Corgo.	35

<b>Figura 4.6-</b> Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003,2004 e 2005, calculada para a Quinta da Pacheca (Domínio 4, a 1x1 $\text{km}^2$ ). .....	36
<b>Figura 4.7-</b> Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003,2004 e 2005, calculada para a Quinta Santa Eufémia (Domínio 4, a 1x1 $\text{km}^2$ ). .....	36
<b>Figura 4.8-</b> Médias temperaturas média, mínima média e máxima média, dos meses de Abril a Setembro, desde 1976 a 2009, na estação meteorológica da Pinhão (Machado, 2010). .....	37
<b>Figura 4.9-</b> Valores de concentração mensal de $\text{O}_3$ obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta Bom Retiro, Cima Corgo. ....	38
<b>Figura 4.10-</b> Valores de concentração mensal de $\text{O}_3$ obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta do Porto, Cima Corgo. ....	38
<b>Figura 4.11-</b> Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003,2004 e 2005, calculada para a Quinta do Bom Retiro (Domínio 4, a 1x1 $\text{km}^2$ ). .....	39
<b>Figura 4.12-</b> Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003,2004 e 2005, calculada para a Quinta do Porto (Domínio 4, a 1x1 $\text{km}^2$ ). .....	40
<b>Figura 4.13-</b> Médias mensais da temperatura registados na estação móvel da Quinta Ervamoira, para os anos 2003,2004 e 2005. ....	41
<b>Figura 4.14-</b> Valores de concentração mensal de $\text{O}_3$ obtidos por modelação para os anos 2003, 2004, 2005 na Quinta Ervamoira, Douro Superior. ....	42
<b>Figura 4.15-</b> Valores de concentração mensal de $\text{O}_3$ obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta da Leda, Douro Superior. ....	42
<b>Figura 4.16-</b> Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003,2004 e 2005, calculada para a Quinta Ervamoira (Domínio 4, a 1x1 $\text{km}^2$ ). .....	43
<b>Figura 4.17-</b> Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003,2004 e 2005, calculada para a Quinta da Leda (Domínio 4, a 1x1 $\text{km}^2$ ). .....	43
<b>Figura 4.18-</b> Série temporal dos valores horários da concentração de $\text{O}_3$ , de Abril a Setembro no ano de 2017, na Quinta da Leda. ....	46
<b>Figura 4.19-</b> Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para o ano 2017, calculada para a Quinta da Leda (Domínio 4, a 1x1 $\text{km}^2$ ). .....	47
<b>Figura 4.20-</b> Resultado do modelo numérico para os níveis de AOT40 para clima presente, futuro médio e longo sem emissões futuras. ....	49
<b>Figura 4.21-</b> Resultado do modelo numérico para os níveis de AOT40 para clima futuro médio e longo com emissões futuras. ....	49
<b>Figura 4.22-</b> Resultado do modelo numérico de redução de produtividade e qualidade para clima presente, futuro médio e longo sem emissões futuras. ....	51
<b>Figura 4.23-</b> Resultado do modelo numérico de redução de produtividade e qualidade para clima presente, futuro médio e longo com emissões futuras. ....	51



# Lista de Tabelas

<b>Tabela 1.1-</b> Caracterização das Sub-Regiões - área ocupada por vinha (Institudos dos Vinhos do Douro e Porto, 2004).....	5
<b>Tabela 2.1-</b> Natureza e tipo de efeitos do ozono na vegetação.....	12
<b>Tabela 2.2-</b> Valores alvo e objetivos a longo prazo para a proteção da vegetação (DL nº 102/2010, de 23 de Setembro). ....	16
<b>Tabela 2.3-</b> Níveis Críticos para o ozono (adaptado de Ascenso, 2017). ....	20
<b>Tabela 4.1-</b> Médias mensais da temperatura, precipitação e humidade relativa registado na estação móvel presente na Quinta da Leda para o ano 2017.....	45



# Lista de abreviaturas e símbolos

## Abreviaturas

[O <sub>3</sub> ]	Concentração de Ozono
AC	Alterações Climáticas
AEA	Agência Europeia do Ambiente
AOT40	Indicador da exposição acumulada, de todos os valores horários medidos durante o período diurno entre maio a julho, acima de um limiar de 40 ppb
COV	Composto Orgânico Volátil
GEE	Gases de Efeito de Estufa
EEA	<i>European Environment Agency</i>
EMEP	<i>European Monitoring and Evaluation Programme</i>
INE	Instituto Nacional de Estatística
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
NC	Nível Crítico
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Azoto
OTC	<i>Open Top Chambers</i>
PI	Península Ibérica
PODy	<i>Phyto-toxic Ozone Dose</i>
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
ROS	<i>Reactive Oxygen Species</i>
RDD	Região Demarcada do Douro
SUM 06	Indicador de exposição da soma dos primeiros valores de todas as concentrações horárias acima de 60 ppb
UE	União Europeia
UNECE	<i>United Nations Economic Commission for Europe</i>
W126	Indicador de exposição da soma das concentrações horárias das 08:00 às 19:00 horas,
WRF	<i>Weather Research and Forecasting</i>

## Símbolos de elementos químicos

CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
N <sub>2</sub> O	Óxido Nitroso
NO	Monóxido de Azoto

O<sub>3</sub>

Ozono

# 1.Introdução

A importância da cultura da vinha, da produção de vinho e do turismo na Região Demarcada do Douro (RDD) confere à região um papel social, cultural e económico de destaque. No ano de 2016, Portugal foi o 11º maior produtor de vinho e 5º na União Europeia (UE) (IVV, 2016). As previsões do Instituto Nacional de Estatística (2017), indicam que a produção de vinho na região, em 2017, aumentou cerca de 10%. É na RDD que tem origem o reconhecido Vinho do Porto, responsável por mais de 60% do valor total das exportações nacionais de vinho.

O ozono troposférico (O<sub>3</sub>) é um importante gás de efeito de estufa (GEE) e estima-se que seja responsável pelo aumento de 5 a 16% da temperatura global, desde o período pré-industrial, afetando, de forma significativa, materiais, culturas e a saúde Humana (Blanco-Ward *et al.*, 2017; Forster *et al.*, 2007).

A génese do vinho depende das condições atmosféricas, como temperatura e precipitação, das características do solo e da prática vinícola e, prevê-se que o aumento dos níveis de ozono em cenário de alteração climática (AC) afeta de forma significativa o setor vitivinícola (Santos *et al.*, 2013). Dada a relevância da RDD, tanto para a economia como para a identidade nacional, é importante entender o efeito do ozono troposférico na vinha duriense.

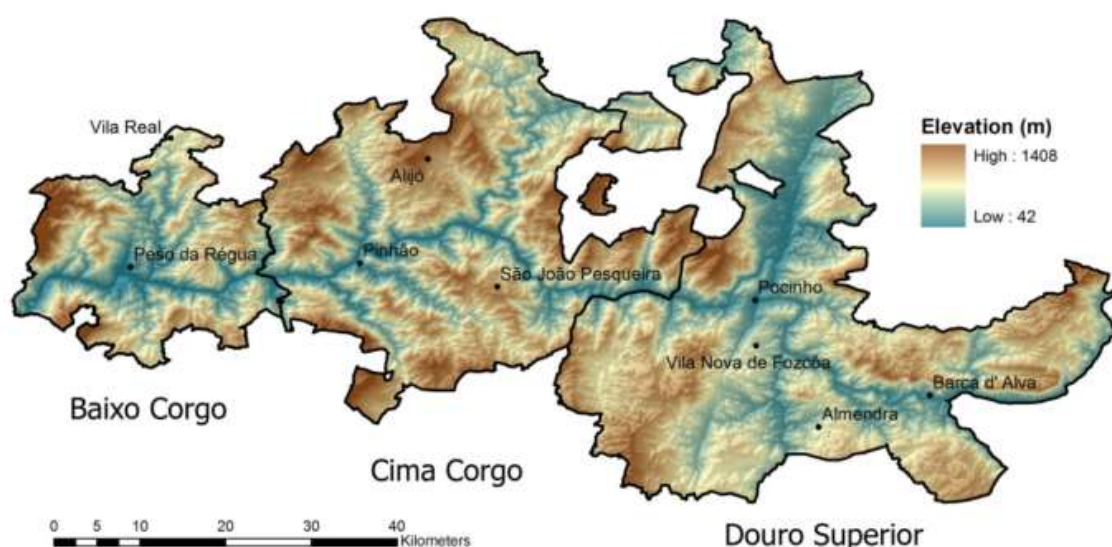
## 1.1. Região Demarcada do Douro

A 10 de Setembro de 1756, o Marquês de Pombal criou a Companhia Geral da Agricultura das Vinhas do Alto Douro e procedeu à primeira delimitação administrativa da região, como objetivo melhorar o cultivo da vinha na região do Douro, salvaguardando as principais características da região. Surgiu assim a primeira região demarcada no mundo em termos de “denominação de origem controlada”. No decorrer dos anos, a Região Demarcada do Douro tem sofrido profundas modificações, de ordem geográfica, regulamentar e técnica, que se têm revelado fundamentais para a melhoria da vinha (Pereira, 2000).

Atualmente a RDD estende-se ao longo do vale do rio Douro desde Barqueiros até Barca d’Alva, na fronteira com Espanha. Devido ao clima peculiar aos solos característicos a produtividade vitivinícola é bastante baixa relativamente a outras regiões no Mundo, contudo o vinho aí produzido é único (Pereira, 2000).

Com uma área total de 250 mil hectares a RDD está dividida em três sub-regiões com características geológicas e climáticas específicas: Baixo Corgo, Cima Corgo e Douro Superior. O Baixo Corgo é a sub-região mais ocidental, a mais pequena das três sub-regiões, mas aquela

em que a vitivinicultura assume maior importância. O Cima Corgo é denominado de “coração do Douro”, devido à sua localização central a região, sendo onde são produzidos os vinhos de maior qualidade. O Douro Superior localiza-se a oriente e caracteriza-se pelas boas condições de produção vitícola, quer pela qualidade das uvas produzidas, quer pela capacidade de mecanização dos terrenos (Pereira, 2000). Na Figura 1.1. apresenta-se a tipografia da RDD, bem como as sub-regiões.



**Figura 1.1-** Sub-regiões da Região Demarcada do Douro e respetiva topografia (Jones, 2013).

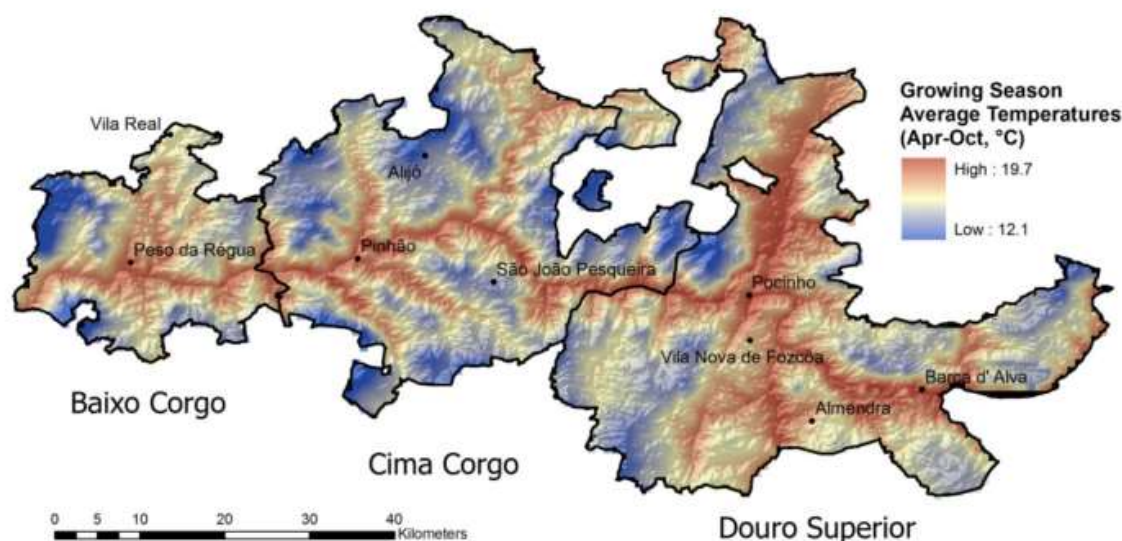
A Região Vinhateira do Douro está delineada entre vales profundos, as suas encostas têm declives acentuado estando exposta a microclimas, consequência da sua acidentada orografia (Pereira, 2005). O arranjo paisagístico imposto pelo rio Douro, é sinal da importância do clima e da morfologia na caracterização de uma região (Almeida, 2006), assim como a variedade das castas e as técnicas utilizadas para o seu cultivo (Jones & Alves, 2012). A altitude média da RDD é 443 m, variando de 40 m a aproximadamente 1400 m (Jones, 2013). Sob o ponto de vista geológico a RDD assenta maioritariamente sobre xisto-grauváquico e granítica, características fundamentais para a qualidade dos vinhos produzidos (Almeida, 2006).

O clima da Região Demarcada do Douro caracteriza-se como mediterrânico, devido à cintura montanhosa que envolve a região e pela influência continental, quando se avança para montante do rio Douro (Jones & Alves, 2012). O clima é frio e húmido no Inverno e muito seco

e quente no verão (Castro, 2013). Dentro da RDD é possível encontrar três situações climáticas distintas, em cada sub-região existem fatores mesoclimáticos associados às diferenças de altitude, exposição, declive e proximidades de cursos de água. O clima na sub-região do Baixo Corgo é mais húmido do que nas outras suas sub-regiões e apresenta um défice de água moderado no período de Verão, enquanto no Cima Corgo e Baixo Corgo o défice de água é elevado (Pereira, 2000).

A geometria natural e a latitude a que a região se encontra faz com que usufrua de um elevado número de horas de sol durante todo o ano. Contudo, as sub-regiões apresentam diferenças de insolação e radiação solar, que se refletem em diferenças térmicas consideráveis. O Douro Superior recebe mais de 2700 horas de sol por ano, sendo esta a sub-região que mais beneficia da radiação solar e o Baixo Corgo a mais prejudicada, devido às encostas montanhosas que a envolvem (Almeida, 2006).

Segundo Martins (2000), as vinhas velhas conseguem, mais facilmente, suportar as elevadas temperaturas durante o verão pois têm raízes bastante profundas e têm facilidade em encontrar alguma humidade nas zonas mais profundas do solo (as cited in Castro, 2013). Na Figura 1.2. é apresentada, para o período 1950-2000, a temperatura média na estação de crescimento da vinha (abril-outubro) que, para vários locais, excedeu o ideal.

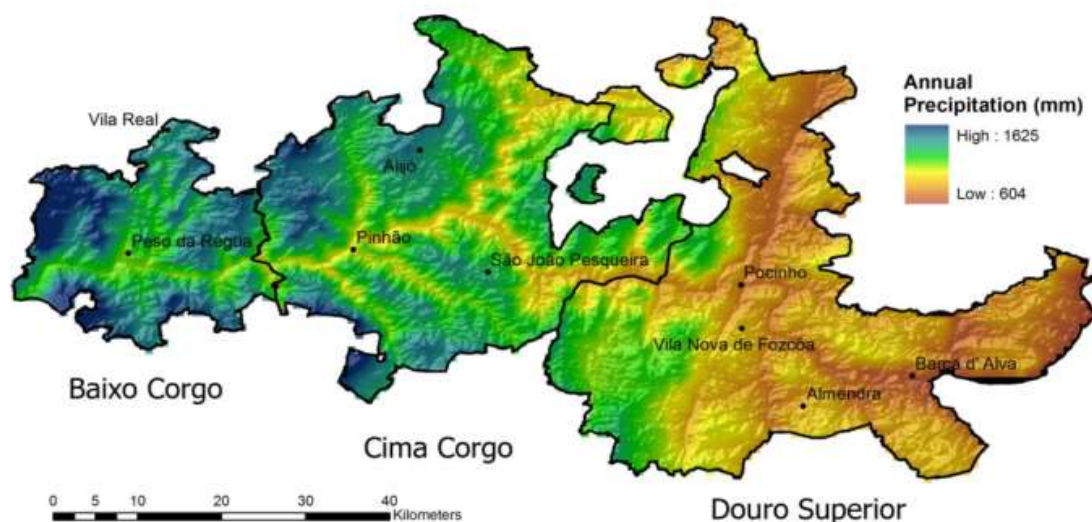


**Figura 1.2** - Temperaturas médias anuais na Região Demarcada do Douro durante 1950-2000 (Jones, 2013).

A RDD apresenta temperaturas mais elevadas junto ao rio Douro e seus afluentes (cotas mais baixas) e nas cotas mais altas as temperaturas registadas são menores. Por sub-região,

durante o inverno a temperatura média é semelhante, no entanto, durante o verão o Douro Superior, que se encontra a sul do rio, apresenta temperaturas máximas e mínimas, significativamente mais elevadas relativamente às outras sub-regiões (Jones, 2013).

Em relação à precipitação na RDD, a sub-região mais seca é a do Douro Superior, enquanto a mais húmida a do Baixo Corgo, apresentando uma mediana anual de 950 mm (Jones, 2013). A variação espacial da precipitação média anual, relativamente aos anos 1950-2000, encontra-se representada na Figura 1.3. É de referir que uma importante área da região vitivinícola do Douro está sujeita a regimes de baixa precipitação e existe maior probabilidade de a região experimentar um ano de seca do que um ano com chuva acima da média (Jones & Alves, 2012).



**Figura 1.3-** Precipitação anual para Região Demarcada do Douro durante 1950-2000 (Jones, 2013).

Almeida (2006) totaliza em mais de 1000 mm/ano a precipitação nas encostas das serras que rodeiam a região e verifica que os níveis de precipitação diminuem do Baixo Corgo para o Douro Superior, não ultrapassando os 500 mm anuais.

Para a videira, durante as fases fenológicas da floração, polinização e fecundação, a precipitação é prejudicial, provocando a abscisão dos botões florais ou bagos recém-criados, destruindo o pólen durante a floração e consequentemente diminuindo o potencial de produção (Castro, 2013; Maciel, 2005). Embora a videira que possa ser cultivada em áreas de sequeiro, necessita de água para o crescimento e desenvolvimento dos seus órgãos, essencialmente nos primeiros anos de vida, de modo a garantir a quantidade e qualidade de produção (Maciel, 2005).



Outras variáveis climáticas, como o granizo e o vento, devem ser tidas em conta quando se analisa o impacto das variáveis climáticas nas regiões vitivinícolas do Douro. O efeito do granizo numa cultura vinícola pode ser catastrófico, as pedras, ao cair, podem provocar lesões nos gomos, quando estes estão em processo de formação, se os gomos ficarem muito danificados, ficará comprometida a colheita do ano seguinte e do próprio ano (Maciel, 2005).

O efeito mecânico e biológico do vento, a que os vales da RDD estão sujeitos, podem originar queda de folhas, desarticulação de jovens pâmpanos e, transporte de insetos e sementes que podem destruir a vinha (Maciel, 2005).

As culturas agrícolas com maior presença na região são a vinha, o olival e árvores de fruto (amendoeira, pessegueiro, damasqueiro e cerejeira). A vinha ocupa cerca de 18% da área total da região, sendo o seu principal foco económico. A região Baixo Corgo embora a seja a que apresenta menor área é a apresenta maior densidade de ocupação da vinha, sendo a região mais fértil, seguida do Cima Corgo e Douro Superior (Magalhães, 2012). A Tabela 1.1 apresenta a área ocupada por cada sub-região e a respetiva ocupação de vinha.

**Tabela 1.1**-Caracterização das Sub-Regiões - área ocupada por vinha (Institutos dos Vinhos do Douro e Porto, 2004)

Sub-Região	Área (ha)	% da Área Total	Área com vinha (ha)	% Área com vinha
<b>Baixo Corgo</b>	45.000	18	14.501	32,2
<b>Cima Corgo</b>	95.000	38	20.915	22,0
<b>Douro Superior</b>	110.000	44	10.197	9,3
<b>Total</b>	<b>250.000</b>		<b>45.613</b>	<b>18,2</b>

O cultivo de uva para produção de vinho é sensível do ponto de vista climático, sendo que uma produção de qualidade apenas se atinge numa faixa geográfica estreita (Jones, 2013; Jones & Alves, 2012).

Embora o estudo do impacto das alterações climáticas na cultura vinícola possa parecer de pouco valor, a sensibilidade e forma de resposta da videira a eventos extremos de precipitação e ondas de calor, pode levar à adoção de medidas preventivas em grandes culturas alimentares.

## 1.2. Ozono

O ozono ( $O_3$ ) é o poluente secundário mais importante à escala regional, que afeta a vegetação, a saúde humana e a composição dos materiais, é também um GEE, sendo um dos responsáveis pelo aumento da temperatura na superfície terrestre (Ainsworth *et al.*, 2012; Ashmore, 2005; Fuhrer, 2009).

O ozono é um conhecido constituinte da atmosfera terrestre, que está presente em duas camadas distintas, estratosfera e troposfera. O ozono presente na estratosfera impede a passagem dos raios ultravioletas, os mais nocivos para os seres vivos. Estes podem causar desde queimaduras solares a cancro de pele e mutações genéticas nas células. O ozono que se encontra na troposfera e, sobretudo, o que se encontra na camada superficial da atmosfera, é um poluente fotoquímico perigoso, com forte poder oxidante (Ashmore, 2005).

O  $O_3$  não é emitido diretamente para a atmosfera e forma-se através de um conjunto de reações químicas entre óxidos de azoto ( $NO_x$ ), compostos orgânicos voláteis (COV) e monóxido de carbono (CO), por ação da radiação solar. Os poluentes primários que dão origem à formação do  $O_3$  são essencialmente resultantes das emissões dos veículos automóveis e de determinadas atividades industriais (Ainsworth *et al.*, 2012).

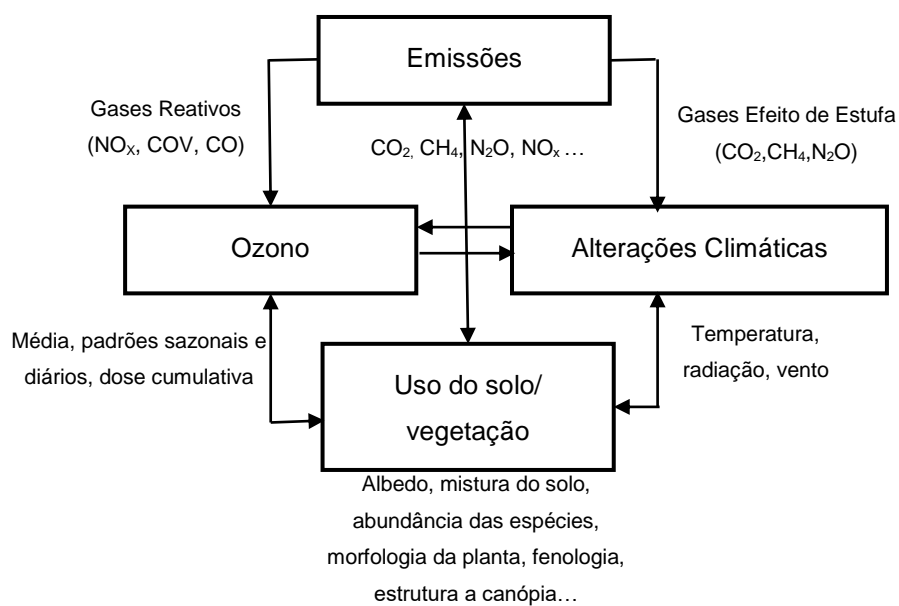
O ozono e os seus precursores, podem ser transportados até longas distâncias e, consequentemente, os episódios de poluição podem ocorrer a centenas de quilómetros das fontes emissoras (Hering, 1966). Estima-se que o tempo de vida do  $O_3$  é de 22 dias ( $\pm 2$  dias) (The Royal Society, 2008), sendo uma característica essencial no transporte deste poluente a longas distâncias.

Geralmente, as concentrações mais elevadas de  $O_3$  ( $[O_3]$ ) observam-se na periferia das zonas de emissão de poluentes antropogénicos. Em ambiente urbano, a produção de ozono é intensa durante o dia e a sua destruição rápida durante a noite. Por outro lado, no meio rural, a ausência de monóxido de azoto (NO) (proveniente dos veículos automóveis) faz com que a destruição de  $O_3$  seja mais fraca, levando a um aumento significativo das concentrações, em termos médios (Instituto do Ambiente, FCT/UNL, 2004).

Os episódios de elevadas  $[O_3]$ , na camada mais baixa da troposfera, ocorrem, especialmente, nos dias de verão, na presença de condições meteorológicas particulares – radiação solar muito intensa, altura da camada limite vertical baixa (facilidade de reação química dos poluentes para formação de ozono), temperaturas elevadas, vento fraco e estabilidade atmosférica – frequentemente associadas à persistência de um anticiclone (Reis, 2008).

Atualmente o  $O_3$  é o poluente atmosférico mais fitotóxico a nível mundial, danificando desde culturas agrícolas sensíveis a espécies florestais (U.S. EPA, 2006a). O  $O_3$  pode reduzir o rendimento agrícola de algumas espécies através de lesões agudas visíveis, em culturas hortícolas que dependem da sua aparência para ter valor no mercado, causando uma perda óbvia e imediata do seu valor económico (Ashmore, 2005). Segundo Fumigalli *et al.* (2001) e Ashmore (2005), o impacto do ozono no rendimento económico das culturas tem sido relatado na América do Norte e na Europa, sendo nas culturas da região do Mediterrâneo que o impacto mais significativo.

Ao contrário do efeito das alterações climáticas, o impacto de elevadas concentrações de ozono ( $[O_3]$ ) é imediato e persistente (Fuhrer, 2009). A importante influência das alterações climáticas na  $[O_3]$  e, vice-versa, leva à necessidade de não se avaliar o risco do ozono tendo em conta, apenas, o clima atual. O desenvolvimento agro tecnológico, a introdução de novas culturas e a complexidade da interação clima-ozono-vegetação dificultam a compreensão do impacto do ozono na vegetação a longo prazo (Fuhrer, 2009) A Figura 1.4. representa um esquema das interações clima-vegetação-alterações climáticas.



**Figura 1.4** -Representação esquemática das interações clima-vegetação-alterações climáticas(adaptado de (Fuhrer, 2009)).

As emissões antropogénicas e naturais, de gases reativos e de efeito de estufa, provocam um aumento da [O<sub>3</sub>] e potenciam as alterações climáticas, posteriormente, afetam a vegetação e o solo. O resultado das interações determina a resposta da vegetação em clima futuro.

Atendendo aos potenciais efeitos negativos da exposição da vegetação ao ozono e a sensibilidade intermédia da vinha ao poluente é importante conhecer a distribuição espacial do mesmo na troposfera em clima atual e em cenário de alteração climática a longo prazo.

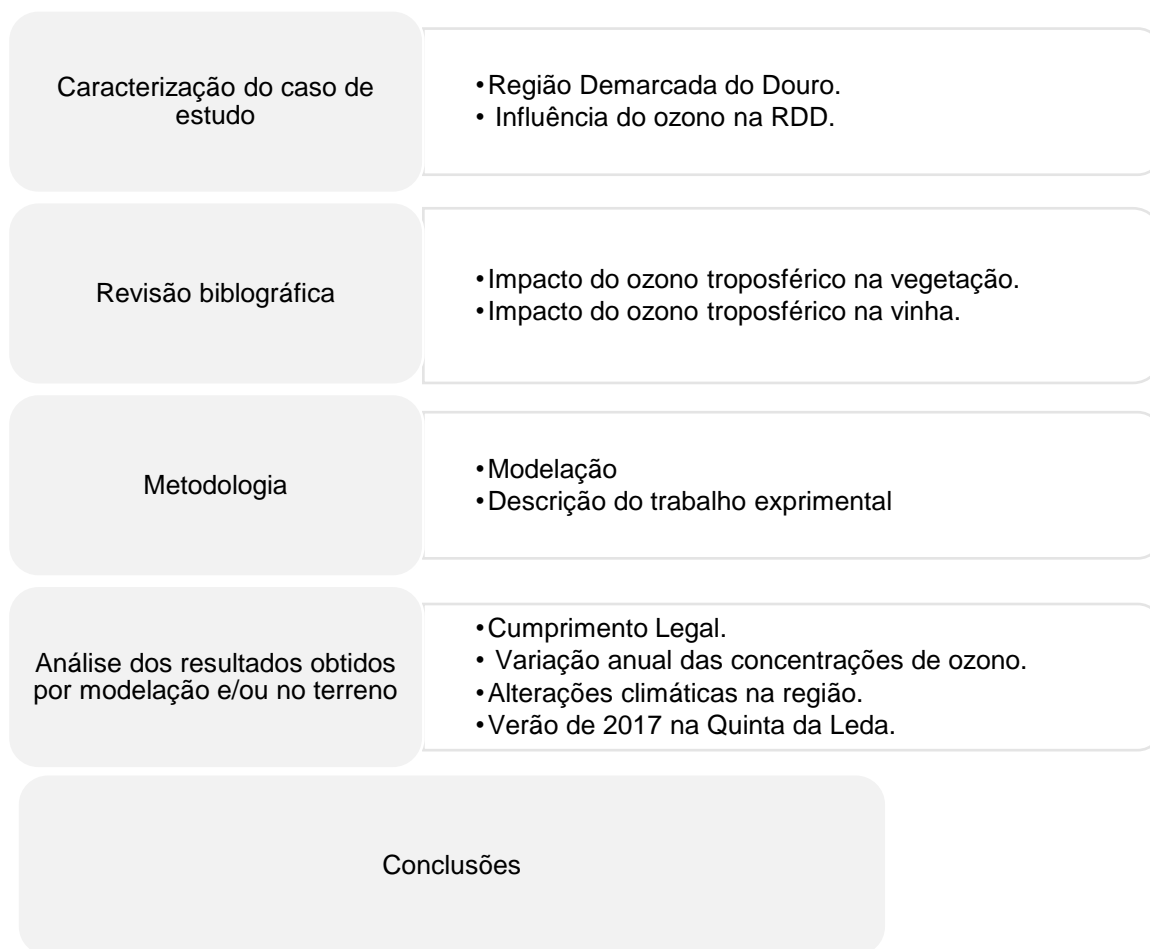
### **1.3. Objetivo**

O clima da Região Demarcada do Douro é mediterrânico, caracterizado por uma forte consistência interanual de insolação total, temperatura e uma significativa variação interanual da precipitação (Jones, 2013). O clima severo e a tipografia característica tornam a região um ponto de interesse para entender o efeito da concentração de ozono nas suas culturas, em especial na vinha.

As condições meteorológicas são um importante fator para o desenvolvimento e produtividade dos campos agrícolas. Ao verão quente da RDD associam-se níveis elevados de ozono no ar ambiente. De acordo com Pereira *et al.*, (2017), em cenário de alteração climática, poderá existir um aumento de 2°C a 4°C da temperatura máxima da Região Demarcada do Douro.

Alterações dos padrões meteorológicos podem prejudicar o desenvolvimento da cultura da vinha: um aumento significativo da temperatura média durante o período vegetativo da videira aliado a uma diminuição na precipitação, pode provocar a maturação precoce dos bagos e tornar a planta mais suscetível a doenças.

O objetivo principal desta dissertação consiste na avaliação de risco de exposição ao ozono das vinhas da RDD em clima atual e futuro, estimando as concentrações de ozono no vale do Douro e avaliando os potenciais prejuízos em termos de produtividade. Para a elaboração deste trabalho adotou-se a metodologia esquematizada na Figura 1.5.



**Figura 1.5-** Representação esquemática da metodologia seguida no presente trabalho.

Numa primeira fase, foi realizada uma caracterização do caso de estudo, a Região Demarcada do Douro, bem como a caracterização do poluente secundário ozono.

Após o capítulo introdutório, o capítulo dois apresenta uma revisão alargada da literatura sobre o efeito do ozono troposférico nas culturas, com principal foco na vinha, assim como, o modo de resposta da vegetação às elevadas concentrações de ozono. São também descritas as normas estipuladas para proteção da vegetação. O terceiro capítulo aborda o conceito de modelação da qualidade do ar, explicando o funcionamento base do modelo de transporte químico adotado no estudo, CHIMERE. Inclui também a descrição do trabalho experimental no âmbito do projeto Dourozone. O capítulo quatro consiste no tratamento e análise dos dados obtidos pelo Dourozone. Apresenta-se também os possíveis efeitos da exposição da vinha ao ozono, tendo por base a aplicação de funções exposição-resposta e uma avaliação dos níveis de ozono no verão de 2007 numa das quintas selecionadas pelo projeto. Por fim, é feita uma síntese conclusiva do trabalho realizado e sugestões de trabalho futuro no capítulo cinco.

Este trabalho insere-se no plano de atividade do projeto de investigação DOUROZONE (PTDC/AAG-MAA/3335/2014; POCI-01-0145-FEDER-016778).

## 2.Efeito do ozono troposférico na vegetação

O ozono é um agente oxidantes presente na troposfera, responsável por inúmeros problemas ambientais. Provoca efeito adversos no meio ambiente, manifestando-se na vida das plantas (culturas agrícolas, vegetação natural, florestas, etc.), na vida dos animais e na saúde Humana. O ozono troposférico, atualmente, é considerado o poluente mais fitotóxico e os seus efeitos nefastos na vegetação foram avaliados para várias espécies de plantas e árvores em vários locais com recurso a várias abordagens de investigação.

Segundo Hayes *et al.* (2007), o ozono provoca danos em várias culturas agrícolas na Europa diminuindo a quantidade e qualidade da produção, com consequências a nível económico. De acordo com Holland *et al.* (2006), num universo de 47 países europeus estima-se que o O<sub>3</sub> seja responsável por perdas económicas no valor de €6,7 biliões (as cited in Afonso, 2014)

Dependendo do tipo e das características da cultura, a resposta às concentrações de O<sub>3</sub> é variável. Mills *et al.* (2007) classificou o trigo, a melancia, as leguminosas, o algodão, o nabo, o tomate, a cebola, a soja e a alface como as culturas mais sensíveis ao ozono. A beterraba, a batata, a planta do tabaco, o arroz, o milho, a uva e o brócolo com uma sensibilidade moderada ao ozono e, a cevada e frutos como as ameixas e os morangos como espécies tolerantes ao ozono (as cited in Fuhrer, 2009).

Relativamente às pastagens, a avaliação do efeito do O<sub>3</sub> troposférico é mais complexa. As pastagens são tipicamente misturas de espécies, variando de monoculturas a uma comunidade multiespecífica de espécies e, dependendo das condições do local e da manutenção podem apresentar baixa ou alta produtividade (Jürg Fuhrer, 2009). Para uma correta avaliação do impacto do ozono nas pastagens, Volk *et al.* (2003), indica que é necessário ter em conta diferentes habitats, climas e níveis de produtividade (as cited in Jürg Fuhrer, 2009).

Segundo Fuhrer (1997), uma pastagem composta por uma mistura de erva, do tipo relva, e trevo (*Trifolium* spp.) diminui significativamente o seu rendimento quando exposta a elevadas concentrações de O<sub>3</sub>, sendo o trevo menos tolerante ao que a erva ao ozono. Nussbaum *et al.* (1995) concluiu que para uma pastagem composta por trevo branco (*Trifolium repens*) e *Lolium perenne*, a resposta do trevo branco diminui, significativamente, quando exposto a pequenas [O<sub>3</sub>] durante um longo período de tempo e, *Lolium perenne* é facilmente afetado por elevadas [O<sub>3</sub>] num curto período de tempo (as cited in Jürg Fuhrer, 2009).

## 2.1. Modo de ação e resposta da planta

A avaliação do risco do O<sub>3</sub> na vegetação requer uma compreensão fundamental do funcionamento da vegetação e de como as influências ambientais externas podem alterar as suas funções vitais. Para organismos biológicos submetidos a elevadas [O<sub>3</sub>], as alterações podem ser complexas e múltiplas. Além disso, os organismos biológicos, como as células, têm a capacidade de alterar irreversivelmente a sua forma dificultando a percepção do “correto” funcionamento. Na

**Tabela 2.1-** Natureza e tipo de efeitos do ozono na vegetação.

Natureza dos efeitos	Efeitos	Referências
<b>Danos foliares</b>	Danos foliares visíveis caracterizado pelo aparecimento de pigmentos e lesões necróticas Senescência prematura	Chappelka <i>et. al</i> (1997); Hayes <i>et. al</i> (2007); Pell <i>et. al</i> (1997)
<b>Crescimento e vigor</b>	Diminuição do crescimento Diminuição da capacidade de resistir e outros stresses bióticos e abióticos	Ashmore (2005); Sandermann (1996)
<b>Produção e qualidade</b>	Diminuição da produção Diminuição da qualidade das culturas agrícolas	Booker <i>et. al</i> (2009) ;Fuhrer (2003)
<b>Comunidade e ecossistema</b>	Alteração da composição do ecossistema (extinção das espécies mais sensíveis)	Ainsworth <i>et al.</i> (2012) ;Ashmore (2005)

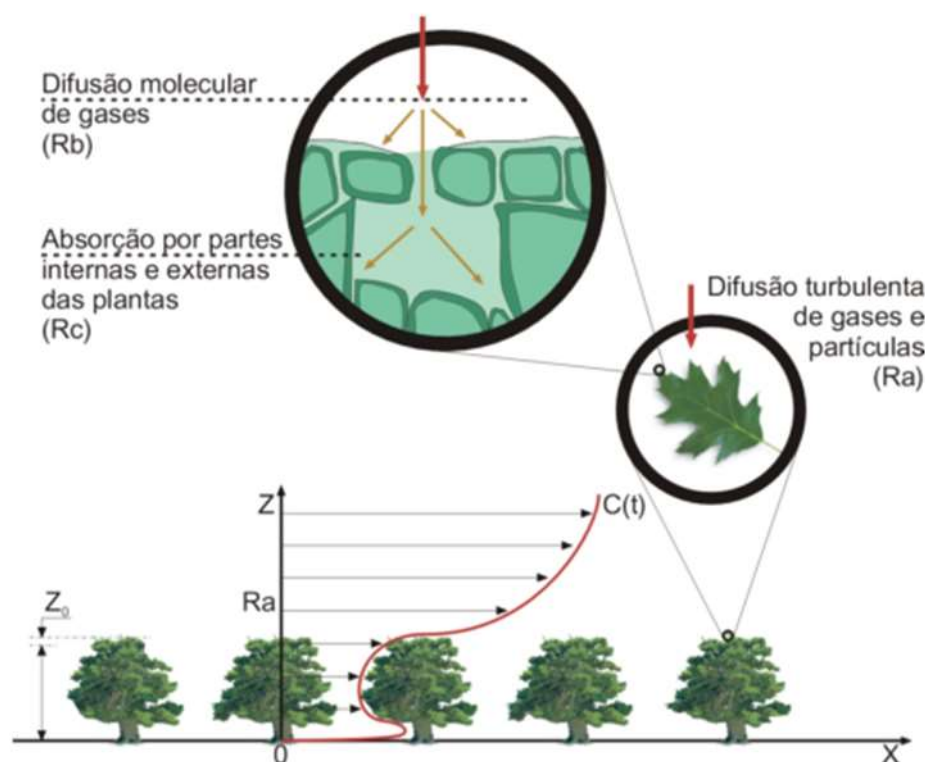
Os efeitos da exposição das plantas aos poluentes atmosféricos são tradicionalmente classificados como agudos e crônicos, com base no tipo de resposta da planta à exposição aos poluentes atmosféricos. As respostas agudas alteram rapidamente os processos biológicos e fisiológicos, dando origem ao aparecimento de lesões visíveis na zona da folha (Feliciano, 2001; Krupa & Manning, 1988). Este tipo de resposta é induzido pela exposição da planta a uma elevada concentração de um poluente durante um curto espaço de tempo. Pelo contrário, os efeitos crônicos resultam da exposição prolongada à poluição do ar; a planta está sujeita a menores concentrações horárias e a níveis de concentração variáveis. Enquanto os efeitos agudos não se refletem ao nível da comunidade vegetal, os efeitos crônicos refletem-se a nível da planta e do ecossistema (Feliciano, 2001; Kickert & Krupa, 1990).

De uma forma geral, os efeitos dos poluentes atmosféricos nas plantas ocorrem tanto a nível das superfícies como dos tecidos internos. Os danos superficiais são claramente visíveis na



área das folhas, manifestando-se geralmente pelo aparecimento de manchas esbranquiçadas ou coloridas. A nível dos tecidos internos, os danos, resultam essencialmente da aptidão que os gases apresentam para se difundir através dos estomas das plantas, atingindo os seus organelos mais importantes (núcleo e cloroplastos) provocando alterações estruturais nas membranas celulares, e a necrose de alguns tecidos mais sensíveis. Como resposta, por parte da planta, à exposição a determinados poluentes, a vegetação pode proteger-se e/ou reparar os danos aumentando a sua atividade enzimática e a produção de espécies químicas necessárias ao seu funcionamento (Kangasjarvi et al., 1994).

A absorção de  $O_3$  pelas plantas é um processo, que envolve a deposição do  $O_3$  no ar ambiente na canópia da vegetação, por fluxo turbulento na camada limite, e a sua absorção pelas superfícies e folhas (Ascenso, 2017; Valinhas, 2000). O processo de absorção é controlado pela camada limite da folha e pelo estoma (poros situados na epiderme das folhas, tendo como função promover trocas gasosas entre o ar exterior e o interior da folha) (Mauzerall & Wang, 2001). O processo de deposição seca é ilustrado na Figura 2.1.

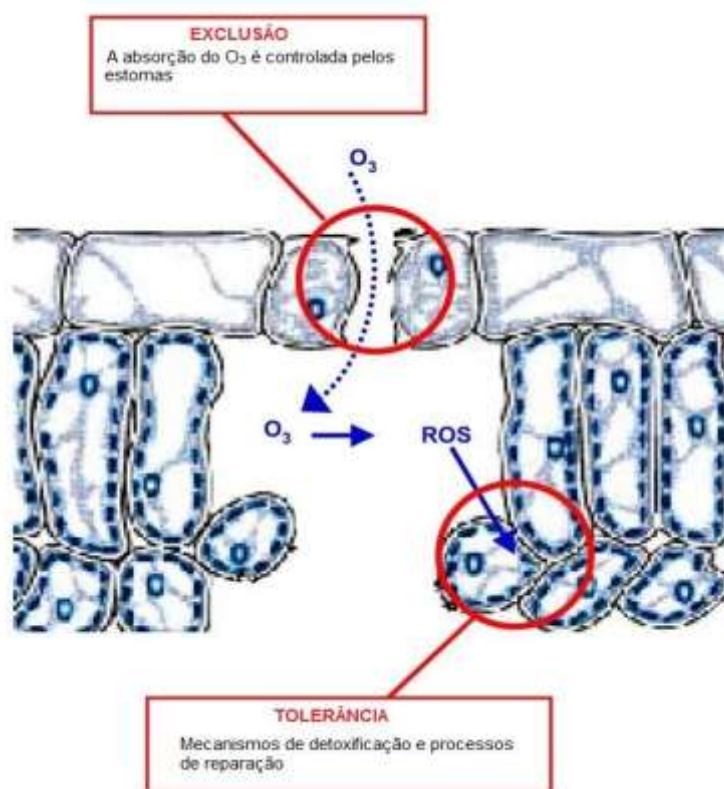


**Figura 2.1-** Processo de deposição seca. (Valinhas, 2000).

A difusão de  $O_3$  através dos estomas é um processo que relaciona a exposição do poluente às respostas bioquímicas e fisiológicas das plantas. Esta difusão depende dos processos atmosféricos que ocorrem por transferência de  $O_3$  para a vizinhança da superfície da folha. Esta transferência depende essencialmente da turbulência do escoamento atmosférico e das características foliares da planta, como a orientação, tamanho, forma e porosidade (Vandermeiren *et al.*, 2009). A difusão dos gases através dos estomas, é proporcional à concentração atmosférica de  $O_3$  e a sua abertura é influenciada por fatores como a temperatura, humidade, concentração de dióxido de carbono ( $CO_2$ ) na atmosfera, velocidade do vento e o teor de água no solo (Sandermann, 1998).

O ozono tem capacidade de atravessar os estomas das plantas, passando de imediato à forma hidratada, provocando danos significativos na estrutura e composição da mesma. Ao penetrar a membrana celular, o  $O_3$  altera o gradiente celular, possibilitando a saída de nutrientes e sais minerais necessários à manutenção das células vegetais (Ainsworth *et al.*, 2012; Fuhrer, 2009). Após reagir com os componentes da parede celular e da membrana plasmática, o  $O_3$  afeta os organelos mais importantes na célula, os cloroplastos e o núcleo, provocando uma alteração no funcionamento metabólico e reduzindo a atividade fotossintética das plantas. Como consequência, as plantas, ficam mais vulneráveis a doenças, insetos e outros poluentes atmosféricos, vendo a sua produtividade e crescimento reduzido (Ashmore, 2005; Vandermeiren *et al.*, 2009).

As plantas resistem ao stress induzido pelo  $O_3$  através de mecanismos, como a exclusão e a tolerância ao ozono (Lopes, 2013; Pasqualini *et al.*, 2001). A Figura 2.2. representa esquematicamente.



**Figura 2.2-**Representação esquemática dos mecanismos de exclusão e tolerância ao  $O_3$  (Lopes,2013).

De acordo com Heath *et.al.*, (1997), exclusão é feita através do fecho dos estomas e da impermeabilidade das membranas, evitando o contacto do ozono com os tecidos sensíveis da planta. A tolerância resulta de mecanismos de destoxificação das espécies reativas ao oxigénio (ROS), através de antioxidantes enzimáticos existentes na célula ou induzidos pelo ozono (as cited in Lopes, 2013)

Para além dos mecanismos de resistência, as plantas tentam compensar os efeitos do ozono modificam certos processos fisiológicos, que inclui alterações na taxa fotossintética, na distribuição raiz/parte aérea dos hidratos de carbono, no desenvolvimento e na senescência (The Royal Society, 2008).

## 2.2. Índices de exposição e nível crítico

O facto de os danos provocados pelo ozono na vegetação terem impactos tanto a nível fisiológico como económico, resultou na necessidade da criação de normas para proteção da vegetação (Paoletti & Manning, 2007), por parte da União Europeia (UE) e da Comissão Económica das Nações Unidas para a Europa (UNECE, do inglês United Nations Economic

Commission for Europe), de modo a estimar níveis críticos para a proteção da vegetação (Lopes, 2013).

Os níveis críticos para o ozono foram definidos em 1988, e têm vindo a ser atualizados com o decorrer dos anos (Fuhrer *et al.*, 1997; UNECE, 2004). Podem ser baseados na concentração cumulativa ou no fluxo estomático cumulativo e são definidos para culturas agrícolas, árvores florestais e vegetação (semi-) natural (UNECE, 2004).

A EU definiu padrões de proteção da vegetação recorrendo ao indicador de exposição acumulada AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ ), que se baseia na soma da diferença entre as concentrações horárias superiores a  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (40 ppb) e o valor  $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$  num determinado período, utilizando apenas os valores horários medidos diariamente entre as 08:00 horas e as 20:00 horas de cada dia (Equação 1) (Directive 2008/50/EC, 2008).

$$AOT40 = \sum_{i=8h}^{20h} [O_3]_i - 80, \quad \text{para } [O_3] \geq 80 \mu\text{g}/\text{m}^3 \quad \text{Eq (1)}$$

Decreto-Lei n.º 102/2010, de 23 de Setembro transpõe a Directive 2008/50/EC para o direito interno, definindo um valor-alvo e um objetivo a longo prazo para a proteção da vegetação, ambos avaliados pelo indicador AOT40, calculado com base na média dos 5 anos anteriores e que deve incluir no mínimo três anos de dados completos. A Tabela 2.2. apresenta o valor-alvo e o objetivo a longo prazo legislados.

**Tabela 2.2-** Valores alvo e objetivos a longo prazo para a proteção da vegetação (DL nº 102/2010, de 23 de Setembro).

	Período de Referência	Limiar
	AOT40 calculado com base	
<b>Valor-alvo para proteção da vegetação</b>	em valores horários medidos de Maio a Julho (inclusive).	(1800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h-calculados em média em relação a cinco anos.
	AOT40 calculado com base	
<b>Objetivo a longo prazo para proteção da vegetação.</b>	em valores horários medidos de Maio a Julho (inclusive).	(6000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h

Nos Estados Unidos é utilizado o indicador SUM06 e o indicador W126. SUM06 é o somatório de todas as concentrações horárias de  $\text{O}_3$  acima de 60 ppb durante três meses consecutivos na estação de crescimento. Os três meses necessários para o cálculo do

indicador são ambíguos e podem variar de espécie para espécie (Equação 2) (Mauzerall & Wang, 2001).

O W126 é geralmente visto como o que melhor representa a perda de rendimento, mas é mais difícil de implementar como um padrão regulamentar. Traduz-se pela soma das concentrações horárias, durante as horas do dia (08:00 às 19:00 horas), multiplicada por uma função ponderada, que visa preferencialmente as concentrações mais elevadas (Equação 3) (Mauzerall & Wang, 2001).

$$SUM06 = \sum_{i=1}^n [O_3]_i, \quad \text{para } [O_3] \geq 60ppb \quad \text{Eq (2)}$$

$$W126 = \sum_{i=8h}^{19h} [O_3]_i \left[ \frac{1}{1 + 4403 \cdot e^{-(126 \cdot [O_3]_i)}} \right] \quad \text{Eq (3)}$$

As limitações do AOT40 levaram ao desenvolvimento de níveis baseados no fluxo. Estes têm em conta a influência da temperatura, luz, potencial hídrico do solo, concentração de ozono e o desenvolvimento da planta (fenologia) no fluxo estomático. Fornecem assim uma estimativa do ozono que entra pelos estomas e alcança os locais de ação no interior da planta e são específicos das espécies (UNECE, 2004).

O indicador  $POD_y$  (*Phyto-toxic Ozone Dose*), ao contrário do AOT40, tem em consideração os fatores que afetam a absorção de ozono pelos estomas da planta e, para a sua determinação é tido em conta o fluxo estomático máximo acumulado, acima do limiar de  $Y$ , ao longo de um dado período de tempo (Equação 4) (UNECE, 2004).

$$POD_Y = \int \max (F_{st} - Y, 0) dt$$

onde,

Eq (4)

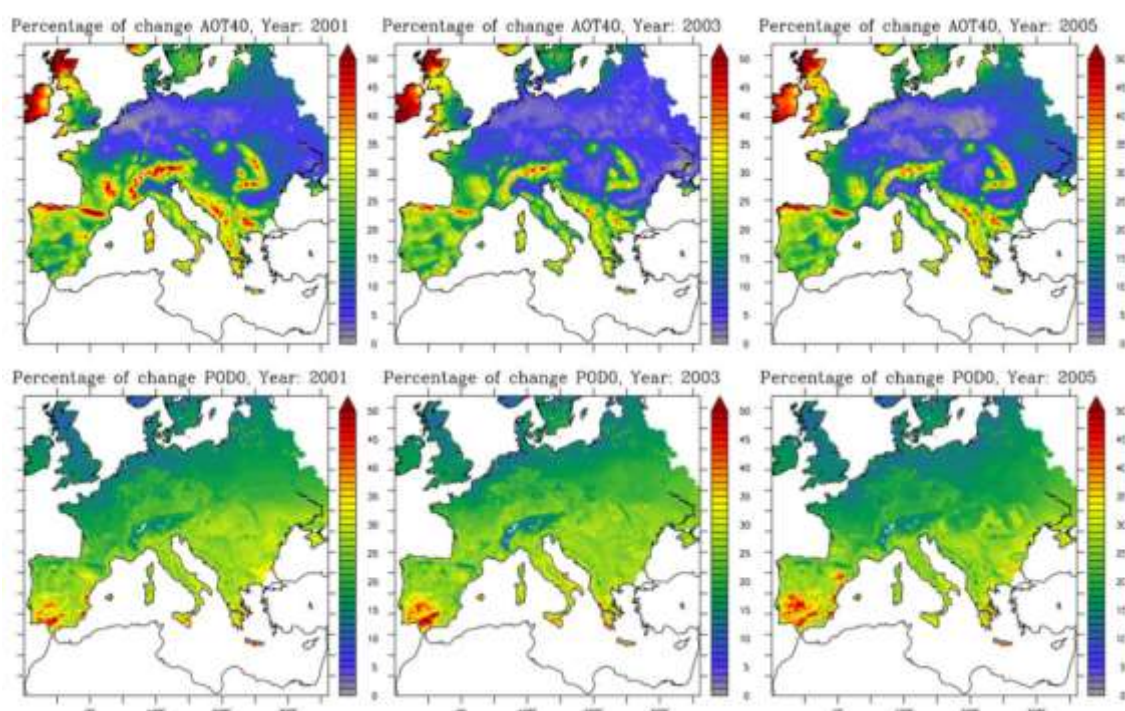
$F_{st}$  – fluxo estomático ( $nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$ )

O valor limite  $Y$ , atualmente considerado para culturas agrícolas (representado pelo trigo) é de  $6\ nmol\ m^{-2}\ s^{-1}$  (POD6), por área de folha.

O  $POD_y$  quantifica parâmetros como a disponibilidade de água no solo, os estados fenológicos e os fatores meteorológicos, possibilitando uma avaliação mais realista das respostas das culturas à exposição ao ozono (Anav *et al.*, 2016).

O indicador AOT40 foi usado no presente trabalho para avaliar o risco de exposição, sendo este estabelecido na legislação europeia para responder ao objetivo de proteção da vegetação às concentrações elevadas de O<sub>3</sub>, acumuladas durante a época de crescimento (de maio a julho). Este índice foi escolhido pela sua simplicidade e flexibilidade na manipulação de diferentes ecossistemas, bem como pelas suas relações lineares com rendimento ou perda de biomassa.

Contudo para Ashmore *et al.*, (2004) a abordagem que melhor representa a resposta das plantas aos efeitos do ozono é a quantificação do fluxo estomático, devendo utilizar-se a dose interna, em vez da exposição, nas avaliações de risco. Anav *et al.*, (2016) avaliou as condições espaciais e consistência temporal entre avaliação de risco baseada no indicador AOT40 e POD<sub>y</sub>, determinou que o POD<sub>y</sub> apresenta valores mais elevados em ambiente mais húmidos, mesmo quando associado a menores concentrações de ozono, enquanto o indicador AOT40 mostra valores mais altos onde as concentrações de O<sub>3</sub> são mais elevadas. Na Figura 2.3. são apresentados mapas de AOT40 e de fluxo estomático para três anos distintos.



**Figura 2.3-** Variação entre o indicador AOT40 (superior) e POD<sub>y</sub> (inferior) calculados por comparação dos dois indicadores ao longo do ano com a estação de crescimento (Anav *et al.*, 2016).

Os mapas reforçam as diferenças entre abordar os efeitos do ozono aplicando as relações dose-resposta (POD<sub>y</sub>), baseados no fluxo estomático, e a abordagem exposição-resposta (AOT40) (Anav *et al.*, 2016; Pleijel *et al.*, 2007). Numa comparação geográfica, em regiões onde as concentrações de ozono estão associadas a condições meteorológicas quentes e

secas (Sul da Europa), o fluxo estomático de ozono é mais reduzido, uma vez que a vegetação tende a diminuir a abertura dos estomas para limitar a perda de água (Ascenso, 2017; Ashmore *et al.*, 2004).

Embora o AOT40 seja um indicador limitado, uma vez que o risco depende apenas das concentrações atmosféricas de O<sub>3</sub>, no caso do POD<sub>y</sub> existe uma grande incerteza dependendo do mapa do uso do solo e dos parâmetros utilizados em cada categoria de vegetação (Anav *et al.*, 2016).

Nível crítico (NC) é definido como um nível fixado com base em conhecimentos científicos, acima do qual podem verificar-se efeitos nocivos diretos em recetores como árvores, outras plantas ou ecossistemas naturais, mas não os seres humanos (Directive 2008/50/EC). De acordo com UNECE (2004), o indicador AOT40 está na base da abordagem de “tipo 1”, que contempla um único valor AOT40 para cada recetor, não contemplando fatores biológicos ou climáticos que influenciam a absorção de ozono e a resposta das plantas (Ascenso, 2017).

A incerteza associado a abordagem “tipo 1”, por não representa com precisão o risco associado à exposição ao ozono, deu origem a uma abordagem “tipo 2” que tem em conta os processos fisiológicos e processos meteorológicos que condicionam o fluxo estomático (Ascenso, 2017; Soja *et al.*, 2004)

Na Tabela 2.3., encontram-se sumariados os Níveis Críticos de ozono, para cada abordagem de calculo, estabelecidos no âmbito da Convenção sobre Poluição Atmosférica Transfronteira de Longo Alcance.

**Tabela 2.3-** Níveis Críticos para o ozono (adaptado de Ascenso, 2017).

Níveis Críticos baseados na concentração			
Recetor	Efeito	Indicador	Nível Crítico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )h
Campos Agrícolas	Diminuição do rendimento	AOT40	6000
Campos Hortícolas	Diminuição do rendimento	AOT40	16000
Árvores Florestais	Diminuição do crescimento	AOT40	10000
Vegetação natural anual	Diminuição do crescimento	AOT40	6000
Vegetação natural peri-anual	Diminuição do crescimento	AOT40	10000
Níveis Críticos baseados no fluxo			
Recetor	Efeito (% de redução)	Indicador	Nível Crítico $\text{mmol m}^{-2}$
Trigo	Rendimento dos grãos (5%)	POD <sub>6</sub>	1
Trigo	Peso do grão (5%)	POD <sub>6</sub>	2
Trigo	Rendimento proteína (5%)	POD <sub>6</sub>	2
Batata	Rendimento (5%)	POD <sub>6</sub>	5
Tomate	Rendimento (5%)	POD <sub>6</sub>	3
Tomate	Qualidade (5%)	POD <sub>6</sub>	4
Pinheiro e Bétula da Noruega	Biomassa (2%)	POD <sub>1</sub>	8
Bétula e Faia	Biomassa (4%)	POD <sub>1</sub>	4
Pastagens	Biomassa (10%)	POD <sub>1</sub>	2
Pastagens provisórias	Biomassa (15%)	POD <sub>1</sub>	6

A vinha é considerada um campo hortícola, sendo 16000 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )h o nível fixado, acima do qual se podem verificar efeitos nocivos diretos no recetor, valor próximo ao valor-alvo estabelecido pela legislação europeia para a proteção da vegetação.

### 2.3. Estudos da avaliação da exposição

Os estudos sobre o efeito do ozono na produtividade e composição do bago são escassos. Os ensaios realizados nas últimas décadas mostram que os efeitos de uma exposição a elevadas concentrações de ozono na atmosfera causam uma diminuição do crescimento vegetativo e da produtividade da vinha (Grantz *et al.*, 1995; Roper & Williams, 1989,). Booker *et al.* (2009) comprovou que o ozono foi responsável pela diminuição do tamanho do bago e um aumento da acidez total em duas castas distintas no noroeste dos Estados Unidos.

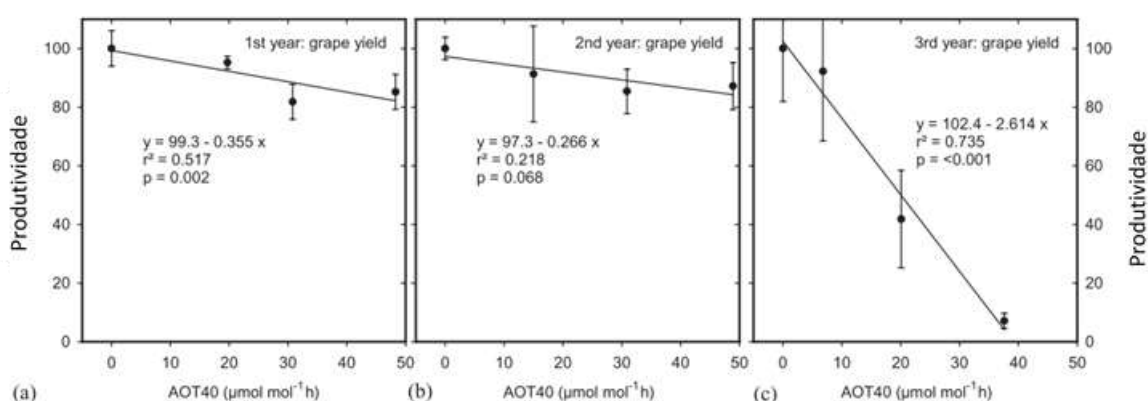


Para a definição dos níveis críticos é necessário conhecer as funções exposição ou dose-resposta de cada espécie. Estudos que definem este tipo de relações são usualmente realizados em ambiente controlado recorrendo *open-top chambers* (OTC), onde as plantas são expostas a uma gama de concentrações de O<sub>3</sub> durante o período de crescimento. Estes estudos são realizados, maioritariamente, para espécies associadas a grandes culturas, como a soja, o arroz, o trigo e o milho (Soja *et al.*, 2004).

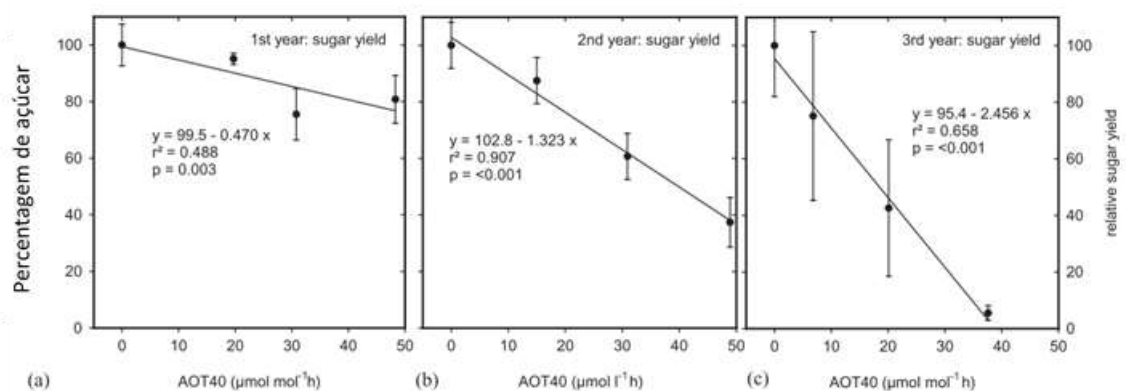
Musselman *et al.* (1978) realizaram um estudo em OTC que comparou o crescimento e o rendimento da vinha com e sem exposição ao ozono ao longo de quatro anos. As vinhas que não foram expostas ao ozono apresentaram menos lesões visíveis e mais sólidos solúveis na fruta.

Soja *et al.* (2004) durante três anos consecutivos submeteu uma casta a uma exposição de diferentes níveis de ozono, tendo observado um efeito gradual de agravamento na quebra de produtividade e de acumulação de açúcares (frutose + glucose) nos bagos ao longo dos anos. Seguindo a mesma metodologia verificaram uma diminuição da produtividade e de acumulação em teor de açúcar no fruto, como consequência da redução da taxa fotossintética e do metabolismo dos hidratos de carbono.

Através da avaliação do efeito da exposição ao ozono em função do rendimento da cultura e das concentrações de açúcar, conseguindo formular as funções exposição-resposta obtidas em função da produtividade e da quantidade de açúcar (Figura 2.4. e Figura 2.5.)



**Figura 2.4-**Relação entre a produtividade da vinha e a exposição ao ozono (AOT40) entre junho e setembro, durante 3 anos (Soja *et al.*, 2004).



**Figura 2.5-** Relação entre a produção de açúcar e a exposição ao ozono (AOT40) entre junho e setembro, durante 3 anos (Soja et al., 2004).

Soja *et al.*, (2004), no terceiro ano, observaram uma redução de produtividade superior a 90%, embora este tenha sido o ano com menor exposição a O<sub>3</sub>. A quantidade de açúcar também diminuiu em 90% no último ano, concluindo que o potencial do desenvolvimento eficaz dos rebentos, é determinada na estação de crescimento anterior (efeito acumulativo) e que a qualidade do fruto pode ser mais sensível ao ozono do que a própria produtividade.

A reação da videira ao ozono troposférico tem sido evidenciada em vários estudos (Fumagalli *et al.*, 2001; Saitanis, 2003; Pellegrini *et al.*, 2015; Krupa *et al.*, 2001), em que a redução da condutância estomática e da assimilação líquida de CO<sub>2</sub> e o incremento da senescência foliar precoce, são referidos como os principais sintomas do seu efeito oxidante. Os sintomas visíveis traduzem-se no aparecimento de pequenas manchas pontilhadas de cor castanha, que evoluem para um enegrecimento. Os sintomas traduzem-se no aparecimento de pequenas manchas na parte superior da folha, que posteriormente se traduz num enegrecimento foliar (Figura 2.6.)



**Figura 2.6-** Sintomas visíveis característicos do efeito do ozono em folhas de videira (Krupa et al., 2001).

O trabalho experimental em OTC no que diz respeito a estudos do efeito do ozono na vegetação, apresenta algumas limitações, e a tendência recente aponta para mais abordagens

baseadas em estudos de campo. Este tipo de procedimentos é dispendioso e requiere um longo período de tempo para obter resultados.

A utilização de modelos de qualidade do ar para determinar a concentração e o fluxo estomático apresenta-se como uma alternativa importante para o estudo dos impactos da exposição de vegetação ao ozono.

Emberson *et al.*, (2000) desenvolveram um modelo para estimar o fluxo estomático de ozono na Europa que foi incluído no sistema de modelação EMEP.

Recorrendo ao AOT40 e a funções exposição-resposta estabelecidas em estudos de campo, Avnery *et al.* (2011) calcularam a diminuição no rendimento global de três culturas (soja, trigo e milho) e as respetivas perdas económicas, ao longo do ano 2000, recorrendo a concentrações horárias de O<sub>3</sub> simuladas pelo modelo de qualidade do ar MOZART-2.

A aplicação de modelos permite realizar previsões para futuro, considerando, por exemplo, cenários de alteração climática e permite avaliar parâmetros em locais onde a monitorização não é possível. Feng *et al.* (2008), Fuhrer (2009) e Klingberg *et al.* (2011) avaliaram o impacto da exposição da vegetação ao ozono em clima futuro. No entanto, estudos focados na videira são escassos.



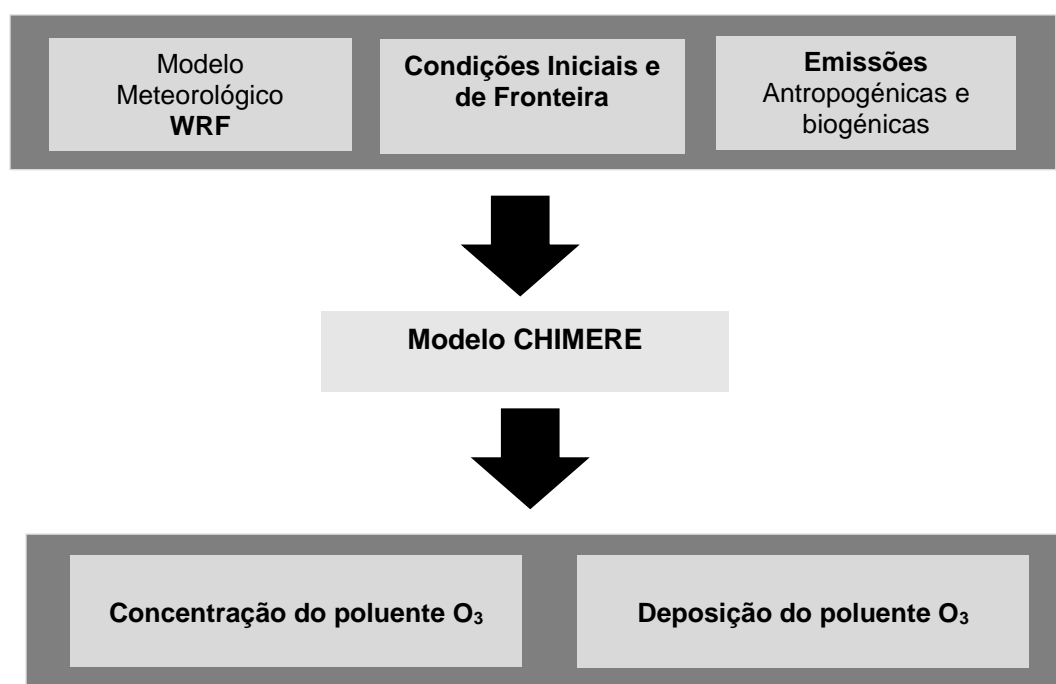
### 3. Metodologia

O presente trabalho seguiu a metodologia do Projeto DOUROZONE, tendo por base a aplicação do modelo químico de transporte multi-escala CHIMERE, tentando avaliar o efeito do ozono troposférico e a vinha da Região Demarcada do Douro.

#### 3.1. Modelação

Para simular os campos de concentração e deposição do ozono na Região Demarcada do Douro, aplicou-se o modelo de qualidade do ar, multi-escala, CHIMERE, desenvolvido na École Polytechnique (Paris, França), concebido, especialmente, para simulações de longo prazo para o O<sub>3</sub> e outros poluentes (Schmidt *et al.*, 2001). O modelo estima a concentração e deposição de poluentes tendo por base a solução Euleriana da equação da continuidade.

Segundo Reid *et al.* (2007), os modelos Eulerianos incluem o tratamento dos fenómenos associados aos processos físicos e químicos que ocorrem na atmosfera (emissões, dispersão, transporte, química e deposição). Similarmente a outros modelos de qualidade do ar, os dados de entrada necessários compreendem informação meteorológica, dados detalhados de emissões (biogénicas e antropogénicas) e a caracterização geomorfológica da região em estudo (topografia e uso do solo) (Ribeiro, 2005). A Figura 3.1. apresenta o esquema do sistema de modelos WRF-CHIMERE adotado para este estudo.



**Figura 3.1-** Esquema do sistema de modelos WRF-CHIMERE.

Os modelos climáticos globais têm sido usados para estudar o impacto das emissões antropogénicas de gases com efeito de estufa em cenários de alteração climática global. Contudo a sua baixa resolução não permite aferir, com detalhe, os fenómenos que ocorrem à mesoescala ou à escala local.

O cenário de emissões de gases com efeito de estufa selecionado, o RCP8.5, tem sido extensivamente considerado internacionalmente. As simulações, de clima atual e de clima futuro, foram obtidas usando um modelo meteorológico regional, o WRF (*Weather Research and Forecasting*), forçado por um modelo climático global – o modelo global do Instituto Max-Planck (MPI-ESM).

O WRF recomendado pelo manual de utilização do CHIMERE (LMD, INERIS, 2016) para o cálculo dos campos meteorológicos. O modelo WRF é considerado de última geração, com muitas melhorias recentes e o modelo CHIMERE pode ser executado diretamente na grelha do WRF, não sendo necessária a interpolação espacial de todos os campos meteorológicos.

Para estimar a concentração de ozono, foi aplicado o modelo químico de transporte CHIMERE, recorrendo aos resultados do modelo WRF. O sistema WRF-CHIMERE foi aplicado para o clima presente (2003; 2004; 2005), futuro a médio prazo (2049; 2064) e futuro a longo prazo (2096; 2097). A escolha dos anos teve por base uma avaliação climática, que os identificou como anos quentes em cada um dos períodos simulados. O Departamento de Física da Universidade de Aveiro realizou as simulações climáticas para os três períodos temporais, de acordo com o cenário de emissões de gases com efeito de estufa do RCP8.5 do Painel Intergovernamental para as Alterações Climáticas (IPCC).

O cenário estudado RCP8.5 considera um forçamento radiativo de  $8,5 \text{ W m}^{-2}$  até ao ano 2100, associado à inexistência de medidas de mitigação e correspondendo à maior emissão de gases com efeito de estufa quando comparado com os restantes cenários desenvolvidos pelo IPCC.

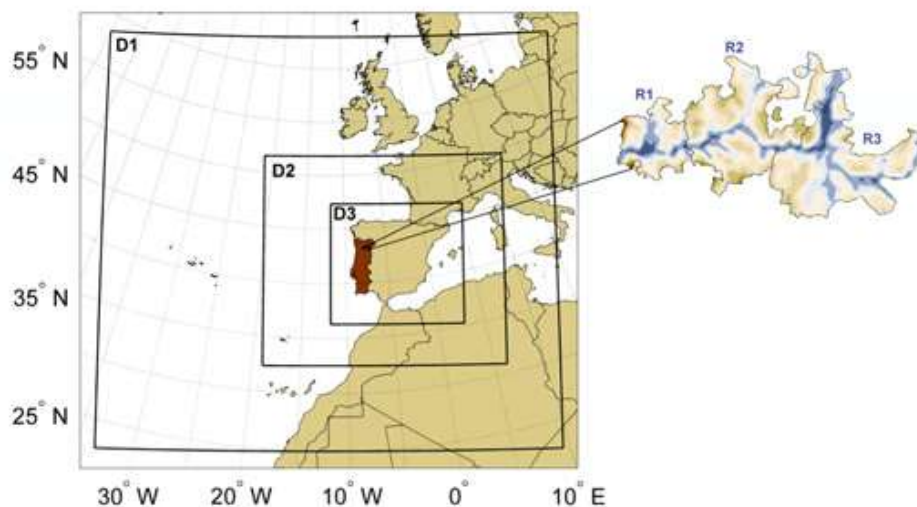
A topografia também é fornecida pelo modelo WRF. Relativamente ao uso do solo, o modelo CHIMERE utiliza, por defeito, a base de dados “*Global Land Cover Facility*” (GLCF) com  $1 \times 1 \text{ km}^2$  de resolução e constituída por 14 classes, posteriormente agrupadas num conjunto de 9 categorias usadas pelo CHIMERE mas, no âmbito do projeto DOUROZONE, a base de dados utilizada foi a “*US Geological Survey*” (USGS) pois deriva do modelo WRF (Ascenso, 2017).

As emissões antropogénicas e biogénicas são consideradas separadamente pelo modelo CHIMERE. As emissões antropogénicas utilizadas são as disponibilizadas pelo inventário de emissões EMEP, resolução espacial limitada à grelha  $50 \times 50 \text{ km}^2$ . Este inventário foi desenvolvido segundo uma abordagem “top-down”, fazendo uma desagregação espacial e

temporal das emissões, através de informação sobre o uso do solo e redistribuindo as emissões anuais, para cada mês e para categoria de emissão, usando os fatores de emissões sazonais disponibilizados pelo *Institute of Energy Research* (Ascenso, 2017). As emissões biogénicas podem ser, ou não, consideradas para no modelo. Sendo um dos objetivos do projeto DOUROZONE avaliar o efeito no  $O_3$  na produtividade e qualidade da vinha as emissões biogénicas são relevantes para avaliar o impacto da deposição de ozono na RDD.

O modelo CHIMERE permite optar entre diferentes mecanismos químicos para a fase gasosa (Monteiro, 2007). Para este trabalho o mecanismo selecionado foi o MELCHIOR2. Segundo Carter (1990), um mecanismo simples com 44 espécies e cerca de 120 reações, seguindo o conceito de “operadores químicos” (as cited in Monteiro, 2007).

Foi aplicado recorrendo à técnica *nesting*, que consiste na capacidade de *zooming* de um modelo em termos de escala espacial, através da qual se usam os resultados da simulação como entradas para uma simulação abrangendo de um domínio mais pequeno. O modelo foi aplicado para quatro domínios, iniciando à escala europeia e terminando na Região Demarcada do Douro (Figura 3.2).



**Figura 3.2-** Domínios de modelo usados na implementação regional da WRF com resoluções de 81 (D1), 27 (D2) e 9 (D3) km<sup>2</sup> (Blanco-Ward et al., 2017).

O domínio usado no presente trabalho foi o domínio 4, que se concentra na RDD e tem uma resolução espacial de 1x1 km<sup>2</sup> e as condições iniciais e de fronteira foram atualizadas de 24h em 24h. O modelo calculou valores horários de concentração de  $O_3$  e  $NO_2$ , acumulada de 12 h em 12 h, ao longo dos anos selecionados.

No presente estudo, por aplicação do modelo CHIMERE foram obtidos os valores médios de AOT40 para os anos 2003, 2004 e 2005 tendo por base os valores horários das 8h-20h durante o período vegetativo (Maio a Julho). Para avaliar as concentrações de ozono sobre a RDD em clima futuro, recorreu-se à simulação e a análise de cinco cenários e um total de 11 anos. Dos cenários de projeção simulados, tendo por base uma avaliação climatológica foi selecionado um período a médio prazo (2046-2065) e um a longo prazo (2081-2100). Os anos 2049 e 2064 foram selecionados para simular o clima futuro a médio prazo e os anos de 2094 e 2097 para o longo prazo. O Departamento de Física identificou os quatro anos de clima futuro como anos particularmente quentes em cada um dos períodos a simular.

Para incluir o efeito das alterações climáticas, estimou-se a concentração de ozono, considerando que as emissões atmosféricas no futuro se manteriam constantes em relação ao clima presente. Foram igualmente considerados os valores de emissão projetados para o futuro de acordo com o cenário RCP 8.5. O modelo foi aplicado com as novas emissões, obtendo-se uma estimativa dos valores futuros de concentração, influenciados pela alteração climática e pela redução de emissões, sendo possível calcular o indicador de exposição AO40 para cada cenário. O tratamento de dados das emissões foi obtido pelo Grupo de Emissões Modelação e Alterações Climáticas (GEMAC) do Departamento de Ambiente da Universidade de Aveiro, presente no âmbito projeto DOUROZONE.

Através da aplicação das funções de exposição-resposta apresentadas por Soja *et al.* (2004) no seu estudo experimental de três anos sobre os efeitos da exposição a longo prazo de videiras ao O<sub>3</sub>, foi possível avaliar o potencial dano em termos de produtividade e qualidade (percentagem de açúcar na uva). A função aplicada neste estudo representa a resposta da videira no terceiro ano consecutivo de exposição, que representa o maior dano na vinha.

### **3.2. Descrição do trabalho experimental**

Ao projeto DOUROZONO estão associadas seis quintas: Quinta da Pacheca e Quinta de Santa Eufémia no sub-região Baixo Corgo; Quinta do Porto e Quinta do Bom Retiro, na sub-região Cima Corgo; Quinta Ervamoira e Quinta da Leda, na sub-região Douro Superior. As quintas diferem em termos de altitude, proximidade ao rio, vegetação envolvente e tipo de casta.

Com o objetivo de relacionar o efeito do ozono troposférico com a localização geográfica de cada quinta e as características meteorológicas específicas para cada sub-região, considerando-se as médias mensais da temperatura e precipitação obtidas nas estações meteorológicas da região ou presentes na quinta.



Para a caracterização meteorológica do Baixo Corgo foram utilizados os registados da estação meteorológica de Cambres, concelho de Lamego, para os anos do clima presente (2003, 2004 e 2005). Para o Cima Corgo, devido à dificuldade encontrada em obter valores dos níveis de precipitação e de temperatura média do ar da estação meteorológica associada a Cima Corgo, estação de Pinhel, recorreu-se ao dados obtidos por Machado (2010), numa avaliação da vulnerabilidade da Região Demarcada do Douro às alterações climáticas. Por último, para o Douro Superior não foi possível ter acesso aos valores da estação meteorológicas de Vilarça, sendo necessário recorrer à estação móvel que, por defeito, caracterizou as variações de temperatura mensais para toda a sub-região.

No ano de 2017, as concentrações de ozono foram monitorizadas, de forma contínua, na Quinta da Leda localizada na sub-região Douro Superior. A monitorização iniciou-se no final de Março e decorreu até Setembro do mesmo ano, abrangendo o período vegetativo da vinha. As concentrações de ozono foram medidas a cerca de 4 metros de altura com recurso a um analisador fotométrico de UV instalado pelos colaboradores do projeto Dourozone. Os valores de temperatura, precipitação e humidade relativa foram recolhidos da estação meteorológica móvel que se encontra na quinta.

As concentrações instantâneas de ozono foram armazenadas temporariamente no equipamento, sendo posteriormente objeto de tratamento matemático por parte dos membros do GEMAC. As concentrações foram utilizadas, no presente trabalho, para determinar o nível crítico AOT40 na Quinta da Leda e também para a avaliação do desempenho do sistema de modelação.

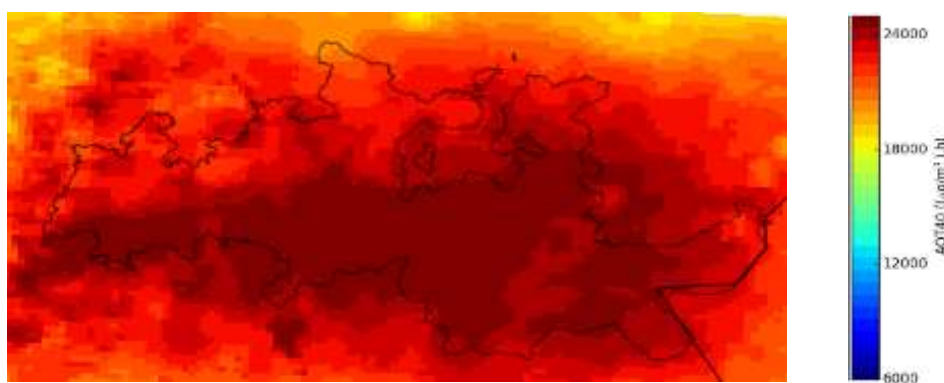


## 4. Resultados obtidos e discussão

Neste capítulo são analisados os resultados obtidos pelo modelo de qualidade do ar CHIMERE referentes aos níveis de AOT40 e de deposição para um clima presente, futuro médio e longo na Região Demarcada do Douro

### 4.1. Cumprimento legal na Região Demarcada do Douro

Na Região Demarcada do Douro, e com base nos resultados de modelação, calculou-se a média do indicador AOT40 para os anos 2003, 2004 e 2005 que se apresenta na Figura 4.1.



**Figura 4.1-** Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) h de 2003 a 2005, calculada para a RDD (Domínio 4, a 1x1 km<sup>2</sup>).

Por observação da figura os valores, para o indicador AOT40 (calculado com base em valores horários das 8h-20h entre Maio e Julho), são superiores a 24 000 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )h, superando 1,3 vezes valor-alvo para a proteção da vegetação (18 000 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )h). Os elevados valores do indicador eram esperados tendo em conta os resultados da EEA (2006), onde todo o território português apresenta valores para a concentração de O<sub>3</sub> compreendidos entre 18000-27000 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )h.

A sub-região Douro Superior é a zona mais afetada pelo efeito do ozono, em termos de área é a maior, mas a que apresenta menor percentagem de área de vinha, contudo é na zona do Douro Superior que são produzidos alguns dos vinhos de maior referência da Região do Douro. A zona sul da sub-região Baixo e Cima Corgo são, do mesmo modo, afetadas pela elevada concentração de ozono.

Para toda a RDD os níveis elevados de AOT40 simulados são elevados, indicando que o ozono pode estar a provocar danos diretos nas vinhas e, consequentemente, diminuindo o seu rendimento e qualidade.

O indicador AOT40 tende a sobrestimar os danos na vegetação, pois a relação concentração-dano não é linear. O período do dia em que as concentrações de ozono são mais elevadas, corresponde às horas do dia em que a absorção da planta é menor (Ascenso, 2017).

## 4.2. Variação anual do O<sub>3</sub> na Região Demarcada do Douro

As seis quintas associadas ao projeto DOUROZONE apresentam características bastante distintas, a sua localização, a proximidade ao rio Douro e seus afluentes, a vegetação circundante e o seu tipo de casta. A Figura 4.3. apresenta a localização das quintas na RDD.

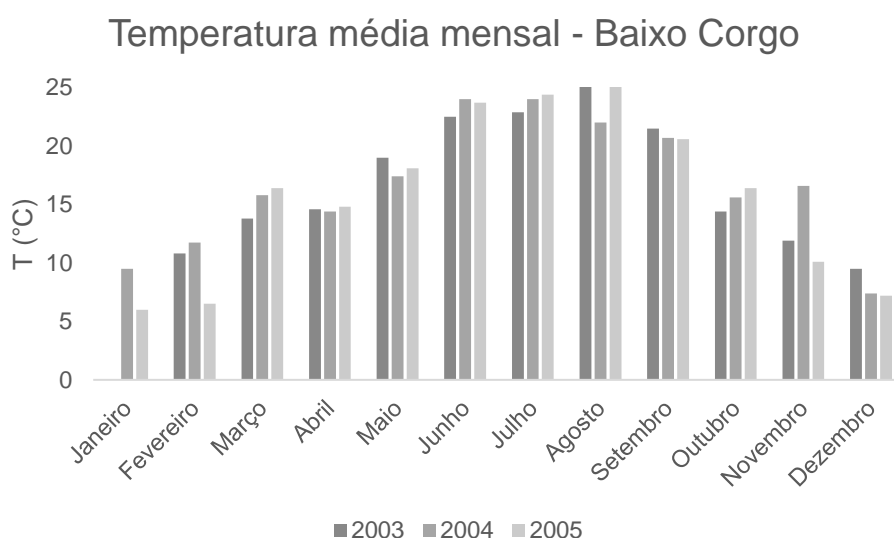


**Figura 4.2-**Localização das quintas na Região Demarcada do Douro.

Identificadas as características mais relevantes de cada quinta, os seus perfis meteorológicos e a os valores de [O<sub>3</sub>] obtidos pelo modelo CHIMERE, foi possível determinar o indicador de exposição AOT40 de modo a relacionar todos os parâmetros.

#### 4.2.1. Baixo Corgo

A Figura 4.3 apresenta a média mensal das temperaturas (°C), registadas na estação meteorológica de Cambres, concelho de Lamego, para os anos seleccionados para caracterizar o clima presente. Em relação à precipitação os valores obtidos para os anos 2003, 2004 e 2005 na estação meteorológica são praticamente nulos, não correspondendo à realidade, de acordo com a Caracterização Climática do Instituto de Meteorologia (2003; 2004; 2005), que registou valores de precipitação durante os respetivos anos.



**Figura 4.3-** Médias mensais da temperatura registados na estação de Cambres para os anos 2003,2004 e 2005.

Em 2003, os meses de Janeiro, Abril, Outubro e Dezembro foram muito chuvosos, causando prejuízos elevados em toda as zonas do país (IM, 2003). Na região o verão foi caracterizado por temperaturas máximas e mínimas muito elevadas no mês de Junho, Julho e Agosto.

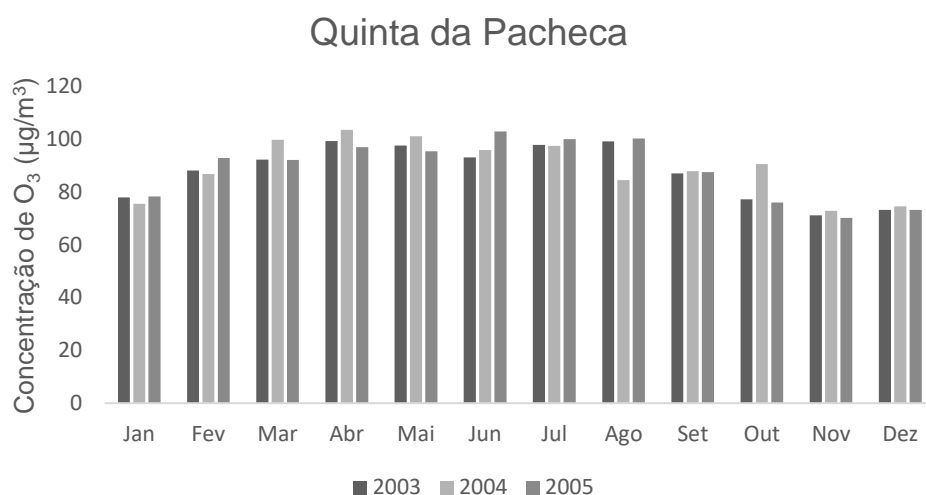
O ano 2004 classificou-se como um ano muito seco, com valores de quantidade de precipitação muito inferiores aos valores médios, excetuando os meses de Agosto e Outubro que apresentaram valores de precipitação muito superiores ao valores médios, em particular na região Norte (IM, 2004). O mês de Junho e Julho registaram temperaturas excecionalmente

altas no Baixo Corgo. Este período seco com alguma intensidade associado a incêndios florestais de grande expansão, afetou essencialmente o setor agrícola e pecuário.

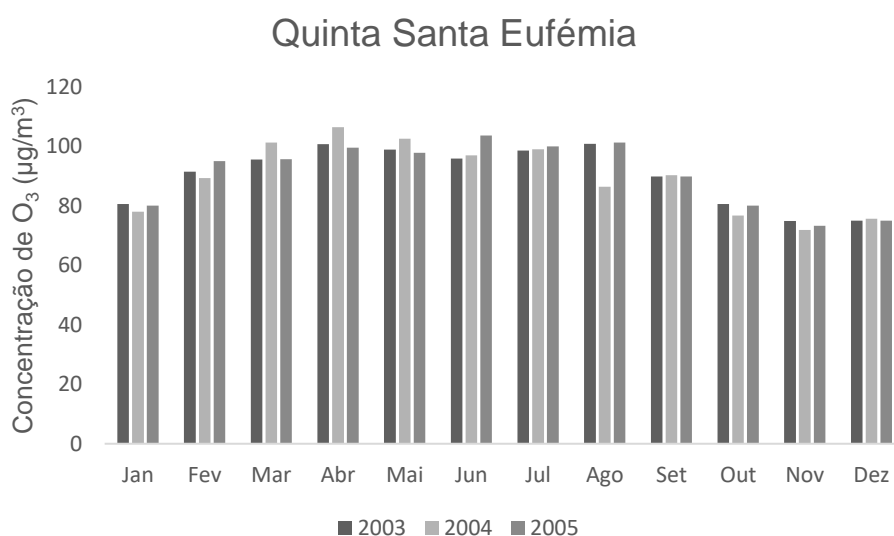
No ano de 2005 a temperatura média do ar registada na RDD foi de 15,7°C, sendo a mais baixa dos três anos analisados. Contudo, os meses Junho, Julho e Agosto registaram temperaturas do ar muito elevadas, tanto no Baixo Corgo como em todo o continente. À semelhança de 2004, 2005 classificou-se como um ano muito seco registando valores muito baixos de precipitação, com exceção do mês de Outubro (IM, 2005).

A Quinta da Pacheca encontra-se próximo da Régua, é uma propriedade de prestígio com 57 hectares. A casa principal da quinta encontra-se a aproximadamente 200 metros de altitude e para além da vinha, está rodeada de plátanos e vegetação rasteira. Foi no ano de 2004 que a quinta registou maiores níveis de concentração de O<sub>3</sub>, contudo os níveis mantiveram um perfil semelhante durante os três anos, registando valores particularmente elevados de Abril a Agosto.

A Quinta Santa Eufémia encontra-se no concelho de Lamego e tem uma área de 80 hectares, a casa principal da quinta encontra-se a 200 metro de altitude. Para além da vinha é possível encontrar plantações de oliveiras ao longo do seu terreno. O ano em que registaram os valores mais elevados da concentração de O<sub>3</sub> foi em 2005, à semelhança da Quinta da Pacheca a média mensal da [O<sub>3</sub>] mantém-se constante nos três anos, contudo a Quinta de Santa Eufémia registou valores mais elevados para a [O<sub>3</sub>] em comparação com os valores da Quinta da Pacheca. Os valores mensais de concentração de ozono, para os anos 2003, 2004 e 2005, estão representados na Figura 4.4 e 4.5.

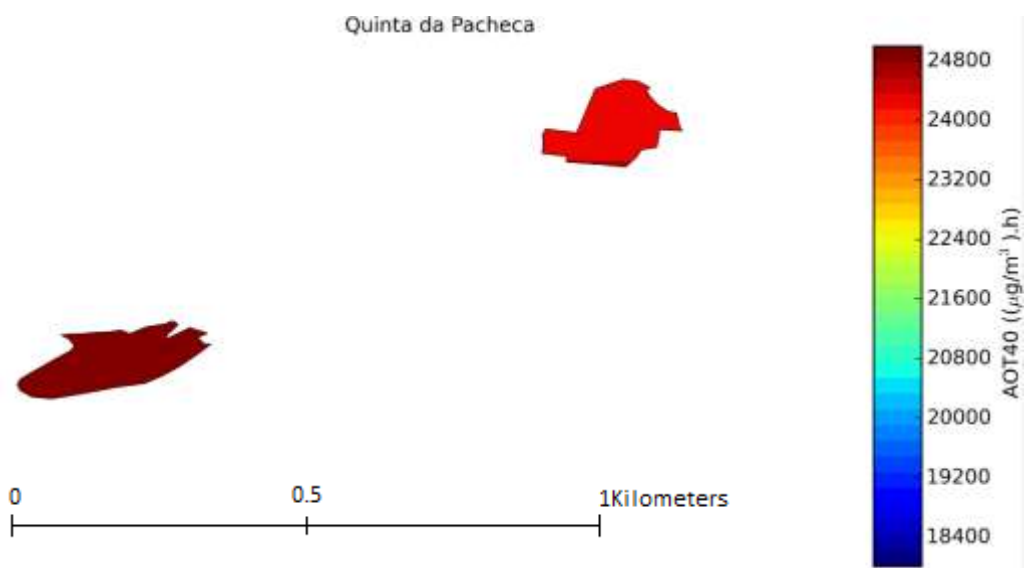


**Figura 4.4-** Valores de concentração mensal de O<sub>3</sub> obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta da Pacheca Baixo Corgo.

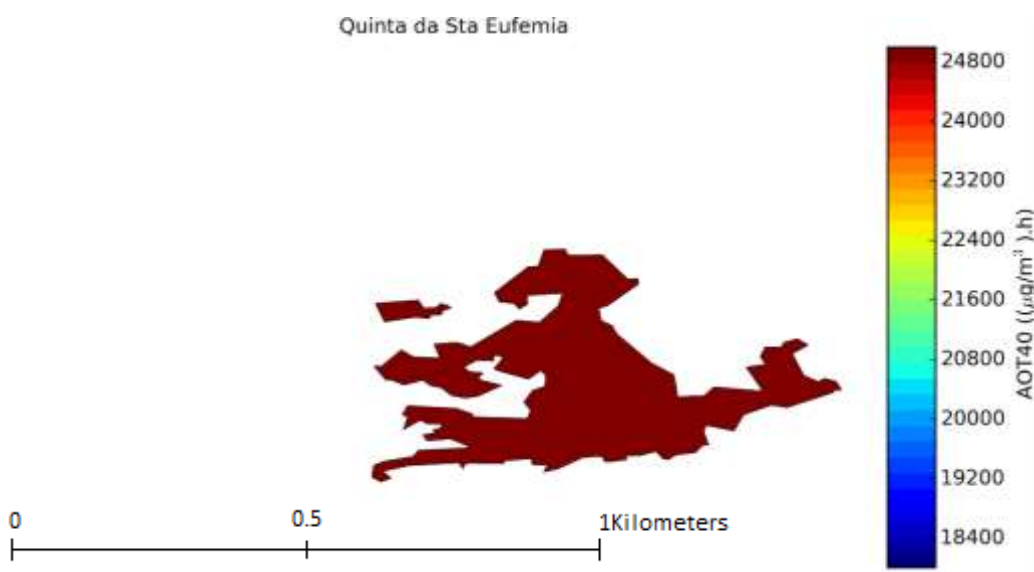


**Figura 4.5-** Valores de concentração mensal de O<sub>3</sub> obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta Santa Eufémia, Baixo Corgo.

No que diz respeito à proteção da vegetação, a verificação do cumprimento do valor alvo de 18000 µg/m<sup>3</sup>.h, calculado através do parâmetro AOT40 com base em valores horários de Maio a Julho foi calculado em relação aos anos 2003 ,2004 e 2005 para cada uma das quintas do Baixo Corgo (Figura 4.6 e Figura 4.7).



**Figura 4.6-** Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003,2004 e 2005, calculada para a Quinta da Pacheca (Domínio 4, a 1x1 km<sup>2</sup>).



**Figura 4.7-** Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003,2004 e 2005, calculada para a Quinta Santa Eufémia (Domínio 4, a 1x1 km<sup>2</sup>).

Em ambas as quintas o valor-alvo para a proteção da vegetação é ultrapassado. Em relação à Quinta da Pacheca a parte que se encontra mais afastada do rio (direita) apresenta valores mais elevados de AOT40, isto deve-se à diferença de altitude entre as duas zonas da quinta. Chevalier *et al.*, (2007) analisou 27 estações de fundo localizadas em alguns países da Europa

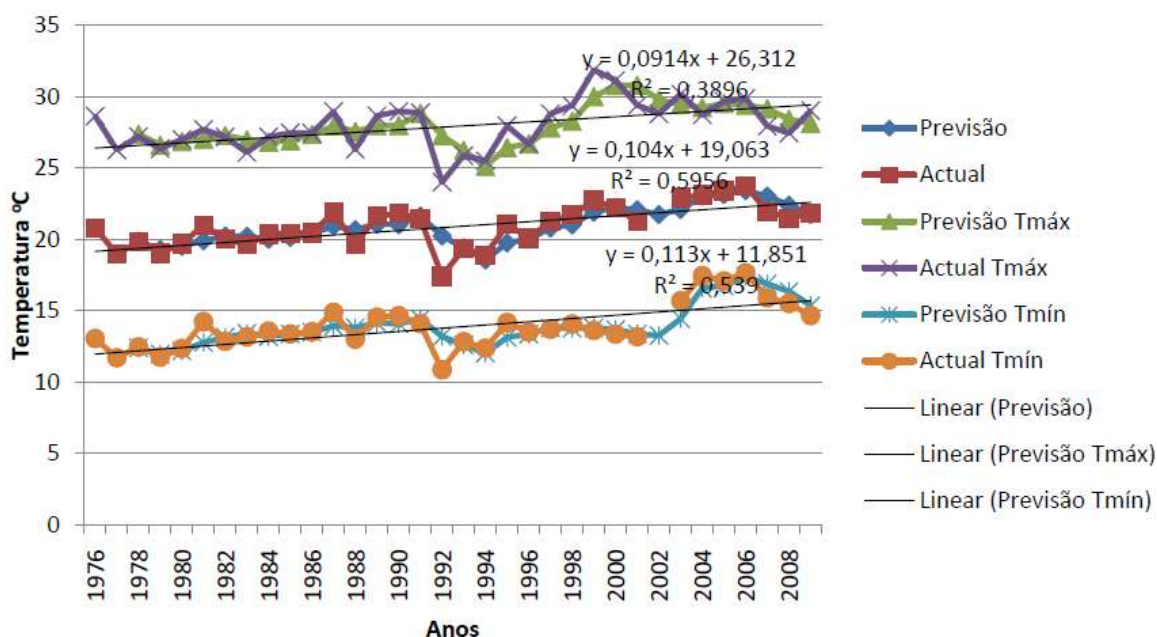


e situadas em diferentes gamas de altitudes e mostrou que os níveis médios de ozono ao nível do solo aumentam com a altitude.

Os mapas de risco calculados com base do indicador de exposição AOT40, permitem concluir que as quintas do Baixo Corgo podem estar em risco. Os resultados mostram que o valor-alvo para a proteção da vegetação foi ultrapassado em toda a área das quintas. Os elevados níveis de AOT40 indicam que o ozono pode estar a provocar danos diretos na produtividade e qualidade das vinhas centenárias desta sub-região.

#### 4.2.2. Cima Corgo

A estação meteorológica de Pinhão registou, ao longo dos anos uma subida da temperatura média, com um aumento significativo da temperatura mínima. A Figura 4.8., ilustra o aumento das temperaturas média na estação, de Abril a Setembro, no período 1976-2008, sendo possível verificar que 2003 foi o ano que registou a temperatura máxima e mínima mais elevada.

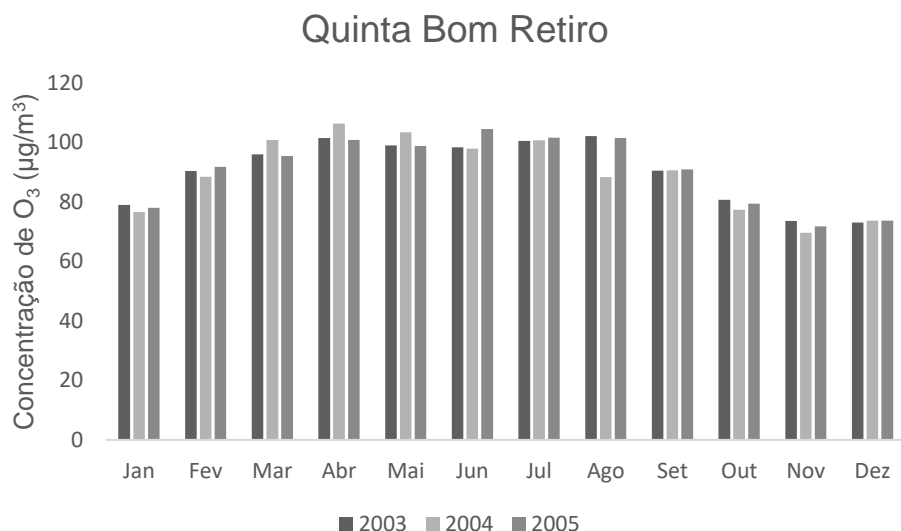


**Figura 4.8-** Médias temperaturas média, mínima média e máxima média, dos meses de Abril a Setembro, desde 1976 a 2009, na estação meteorológica da Pinhão (Machado, 2010).

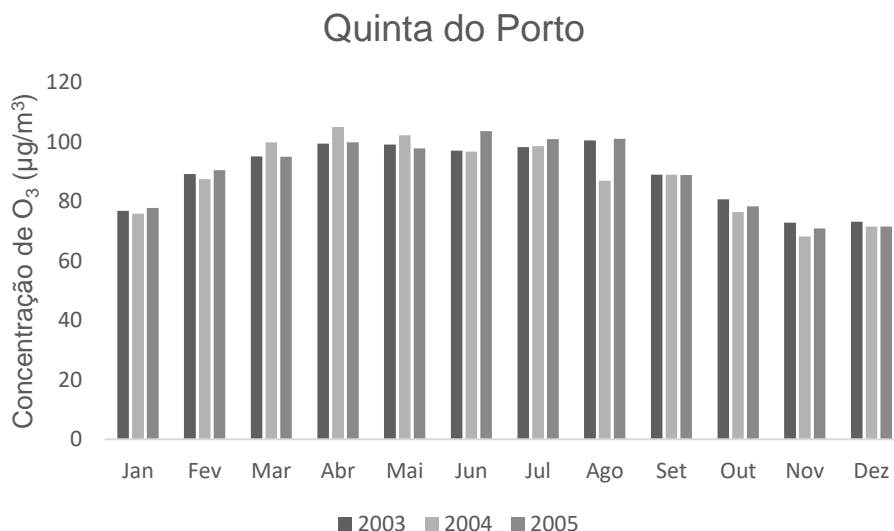
Segundo Machado (2010), a estação do Pinhão apresenta um regime mensal de precipitação relativamente regular, tendo em conta os quantitativos mensais bastante reduzidos, durante os

meses considerados mais chuvosos, facto que se prende com uma localização interior e próxima ao fundo do Vale do Douro, que determina a sua posição de abrigo. Os máximos absolutos dos níveis de precipitação não ultrapassam os 300 mm.

Nas Figuras 4.9 e 4.10 estão representadas as médias mensais, modeladas, das concentrações nas quintas do Cima Corgo, Quinta do Porto e Quinta do Bom Retiro, entre 2003 e 2005.



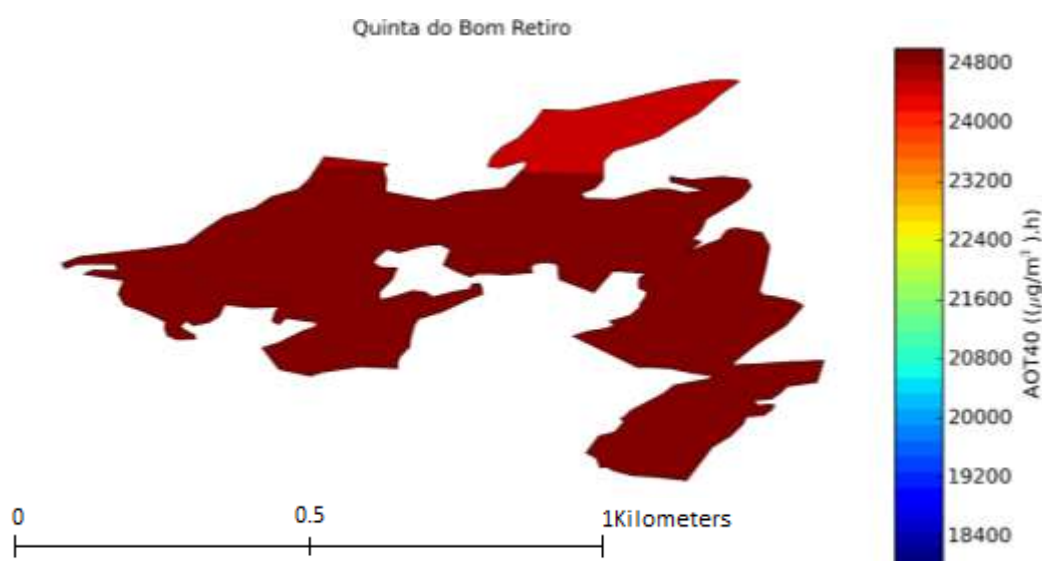
**Figura 4.9-** Valores de concentração mensal de O<sub>3</sub> obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta Bom Retiro, Cima Corgo.



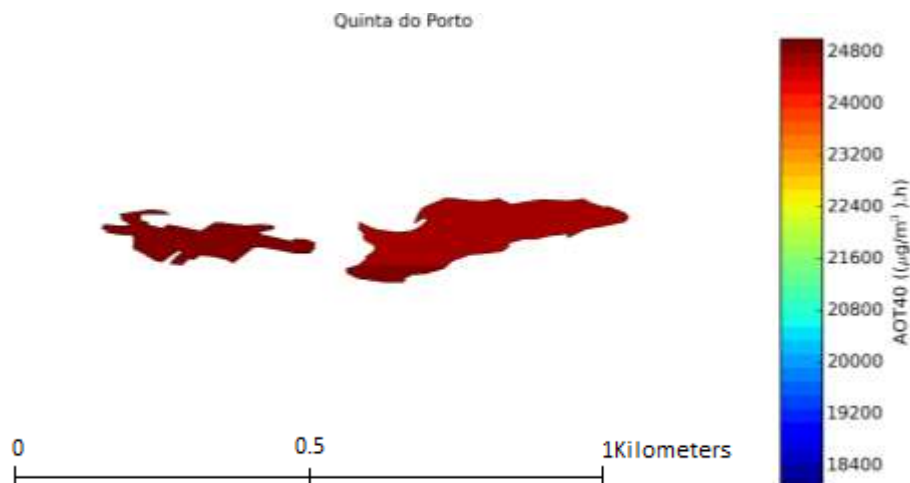
**Figura 4.10-** Valores de concentração mensal de O<sub>3</sub> obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta do Porto, Cima Corgo.

Para a Quinta do Bom Retiro os meses de Abril a Setembro registaram uma concentração média mensal de ozono elevada, superior às quintas do Baixo Corgo. O ano de 2004 registou os valores mais baixos de concentração de ozono na quinta. A Quinta do Porto registou valores inferiores à Quinta do Bom Retiro de concentração mensal de ozono.

Para a proteção da vegetação, o valor-alvo para a proteção da vegetação, AOT40, para a média dos anos 2003, 2004 e 2005 não foi cumprida. As Figuras 4.11 e 4.12 mostram que o valor 18000  $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$  foi excedido em ambas as quintas.



**Figura 4.11-** Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ ), médio, para os anos 2003, 2004 e 2005, calculada para a Quinta do Bom Retiro (Domínio 4, a 1x1  $\text{km}^2$ ).



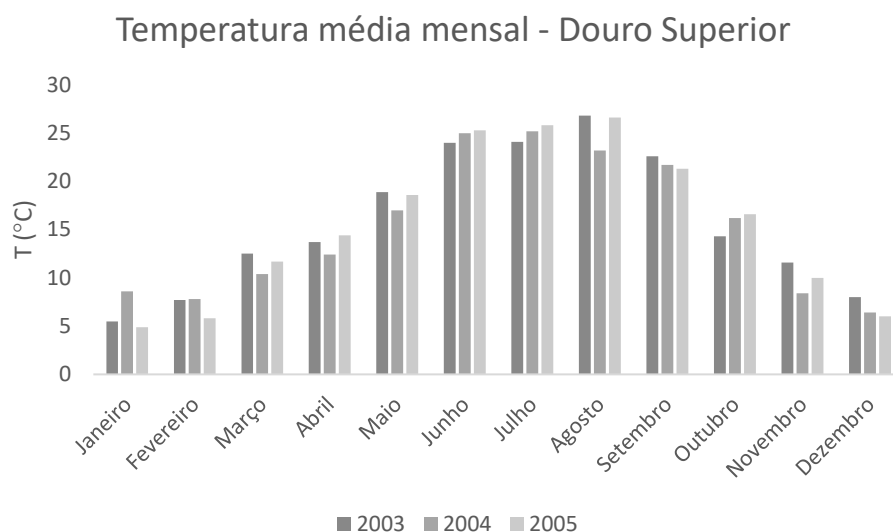
**Figura 4.12-** Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003,2004 e 2005, calculada para a Quinta do Porto (Domínio 4, a 1x1 km<sup>2</sup>).

A Quinta do Bom Retiro apresenta valores mais elevados para a concentração de ozono em AOT40 em relação à Quinta do Porto, podendo a sua extensão, cerca de quatro vezes maior, e a sua localização mais elevada influenciar os valores da concentração de ozono. As regiões mais próximas do rio apresentam valores de concentração de ozono inferiores à restante área, em ambas as quintas.

À semelhança do Baixo Corgo, os elevados níveis de AOT40 podem estar a provocar danos diretos na produtividade e qualidade das vinhas, assim como, nos campos agrícolas da sub-região.

#### 4.2.3. Douro Superior

Para a caracterização da temperatura média do ar, no Douro Superior, recorreu-se à análise de dados registados por estações meteorológicas móveis que se encontram na propriedade da Quinta Ervamoira. A Figura 4.13 apresenta as temperaturas médias mensais registadas, no ano 2003, 2004 e 2005, na Quinta Ervamoira. Relativamente à análise dos níveis de precipitação para os respetivos anos, os valores registados pela estação em nada se assemelhavam à avaliação do Instituto de Meteorologia (2003, 2004, 2005).

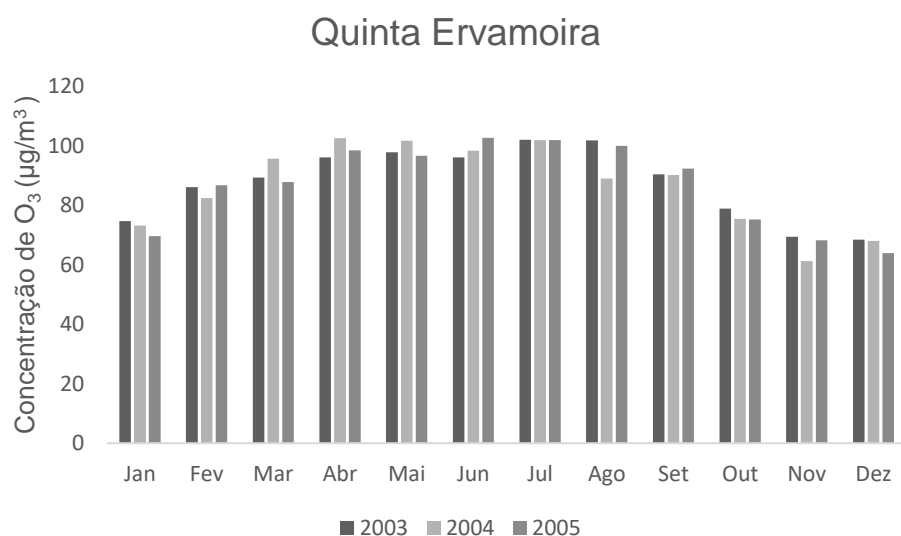


**Figura 4.13-** Médias mensais da temperatura registados na estação móvel da Quinta Ervamoira, para os anos 2003,2004 e 2005.

À semelhança das outras sub-regiões, para os três anos registaram-se temperaturas máximas e mínimas muito elevadas nos meses de verão, de Junho a Agosto, dos anos 2003 e 2005.

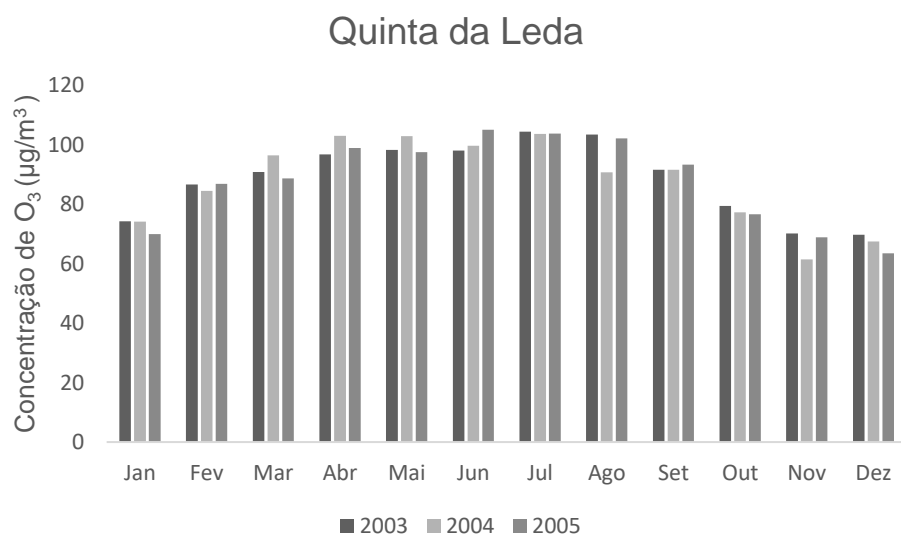
A Quinta Ervamoira e a Quinta da Leda, são as quintas associadas ao projeto DOUROZONE, localizadas no Douro Superior. Ervamoira, possui 234 ha de área total, oscilando entre os 110 m e os 340 m de altitude, na quinta encontra-se plantado vinhas, oliveiras, amendoeiras, azinheiras e zimbros. A Quinta da Leda tem 76 hectares disponíveis e situa-se a uma altitude de cerca de 300 metros.

A Quinta Ervamoira é maior das seis quintas associadas ao projeto DOUROZONE. Uma grande extensão da quinta percorre as margens do rio Côa, a baixa altitude, levando a que as [O<sub>3</sub>] sejam as mais baixas registadas nas três sub-regiões (Figura 4.14).



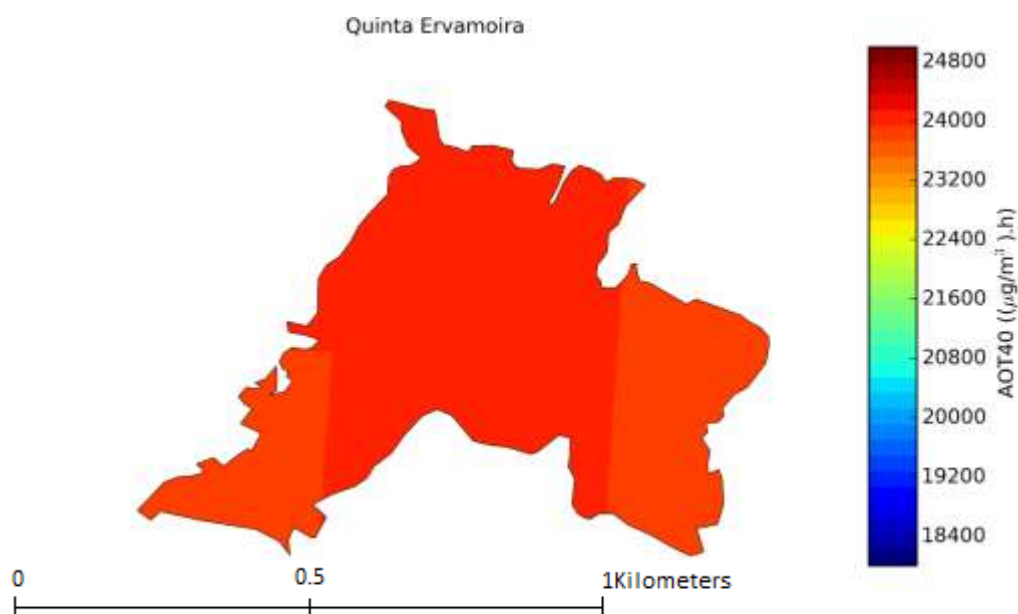
**Figura 4.14-** Valores de concentração mensal de  $O_3$  obtidos por modelação para os anos 2003, 2004, 2005 na Quinta Ervamoira, Douro Superior.

A Quinta da Leda situa-se no interior do Douro Superior, afastada do rio Douro e dos seus afluentes, apresentando, para os anos 2003, 2004, 2005, valores mensais de  $[O_3]$  superiores à Quinta Ervamoira, como apresentado na Figura 4.15.

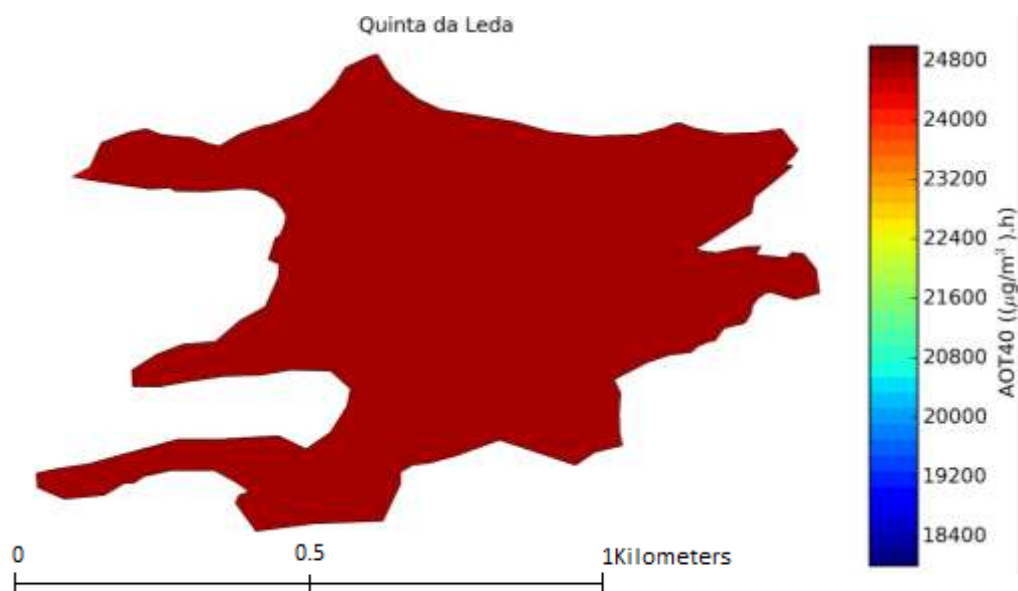


**Figura 4.15-** Valores de concentração mensal de  $O_3$  obtidos por modelação para os anos 2003,2004,2005 na Quinta da Leda, Douro Superior.

O facto do Douro Superior se encontrar a uma altitude inferior ao Baixo e Cima Corgo e as temperaturas baixas que se fizeram sentir durante o Inverno, faz da sub-região a menos afetada pela concentração de ozono. As baixas  $[O_3]$  refletem-se nos níveis de AOT40 das quintas (Figura 4.16 e Figura 4.17)



**Figura 4.16-** Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003, 2004 e 2005, calculada para a Quinta Ervamoira (Domínio 4, a 1x1 km<sup>2</sup>).



**Figura 4.17-** Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ).h , médio, para os anos 2003, 2004 e 2005, calculada para a Quinta da Leda (Domínio 4, a 1x1 km<sup>2</sup>).

Ambas as quintas o ultrapassam o valor alvo para a proteção da vegetação, 18000  $\mu\text{g}/\text{m}^3\cdot\text{h}$ , na Quinta Ervamoira os níveis de AOT40, são menores. A Quinta da Leda mantém a tendência das outras quintas, apresentado níveis de AOT40 muito elevados no seu domínio.

#### **4.2.4. Síntese**

Os meses de Verão estão associados a elevadas temperaturas e elevados níveis de radiação solar, favorecendo os níveis de concentração de ozono na troposfera. Para as quintas da RDD foi nesta estação que se registaram os níveis de ozono mais elevados. Em especial o Verão de 2005 que apresentou temperaturas excecionalmente elevadas, facto que terá contribuído para as elevadas concentrações de ozono obtidas nesse período na RDD.

Tal como as temperaturas extremas, a precipitação pode influenciar os níveis de ozono, levando a uma diminuição da radiação solar incidente e removendo os compostos precursores de ozono da atmosfera. O mês de Agosto de 2004 que, segundo o IM (2004), apresentou valores da quantidade de precipitação muito acima da média, estimaram-se valores da concentração mensal de ozono inferiores em todas as quintas.

O relevo é uma das principais características da Região Demarcada do Douro, cada quinta apresenta uma variação de altitudes entre os 100 e os 400 metros. Na região tanto se encontra plantações vinícolas no ponto mais alto da quinta como junto ao rio. O Douro Superior é a sub-região que apresenta as altitudes mais baixas e, também é nesta sub-região, que os níveis de  $[\text{O}_3]$  são menores, por outro lado, as quintas do Baixo Corgo obtiveram as concentrações mais elevadas.

Dentro de cada sub-região, a localização de cada quinta também reflete o efeito da altitude no aumento da concentração de ozono. A Quinta Ervamoira estende-se ao longo do Rio Côa, a baixa altitude e a Quinta da Leda situa-se concentrada numa zona mais elevada; de acordo com os resultados obtidos pelo modelo, para a quinta a uma altitude mais elevada estimaram-se maiores valores de concentração. Nas outras sub-regiões as diferenças de altitude das quintas não são tão evidentes.

De acordo com a Direção-Geral do Ambiente (2001) e Silva (2008) existem alguns fatores que contribuem para um aumento da concentração de ozono em altitude, uma maior intensidade de radiação solar nas altitudes mais elevadas, o transporte dos precursores de ozono provenientes de áreas urbanas e industriais, o estreitamento da camada de mistura que, imposta pelos acidentes do relevo, conduz a que o volume de ozono troposférico seja distribuído numa faixa atmosférica mais estreita levando a um aumento de concentração.



Os níveis de ozono, expressos em termos de AOT40, durante o período de exposição Maio a Julho, obtido pelo modelos, excedem o valor alvo, estipulado por Lei, 18 000 µg/m<sup>3</sup>.h, em todas as quintas. Nas quintas da RDD, os níveis de ozono obtidos são suficientes para induzir danos nas videiras, indicando que as culturas agrícolas e a vegetação nativa da região, sensível ao ozono, estão em risco de sofrerem efeitos nefastos do poluente.

Contudo é necessário ter em conta que o valor limite definido na legislação foi estabelecido para uma espécie agrícola genérica, sendo que o período de cálculo não abrange todo o período vegetativo da videira e, o nível crítico associado ao AOT40, corresponde à exposição cumulativa suscetível de causar efeitos significativos sobre cultura, florestas e comunidades de plantas naturais e seminaturais podendo estar a sobrestimar os valores obtidos para cada quinta.

### 4.3. Verão 2017 na Região Demarcada do Douro

O verão de 2017 em Portugal continental foi caracterizado por valores da temperatura média do ar superiores ao valor normal e valores da quantidade de precipitação muito inferiores, classificando-se como quente e extremamente seco. O verão de 2017 foi o 6º mais quente e o 3º mais seco desde 2000 com o valor da temperatura média de 22,70 °C e o valor médio da temperatura mínima do ar de 15,18 °C (IPMA, 2017).

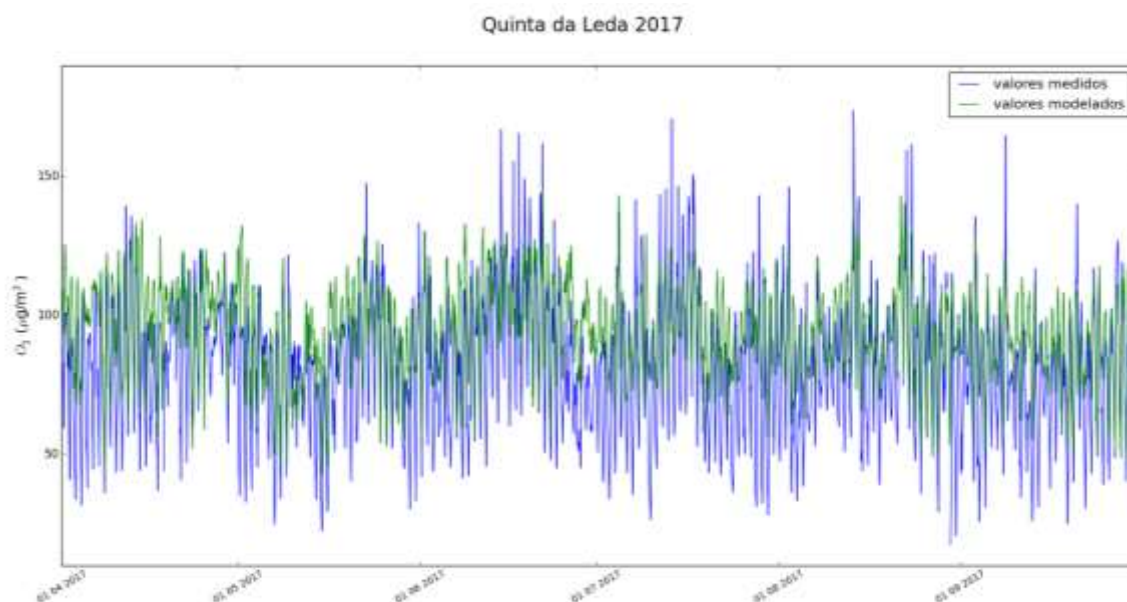
Durante o ano de 2017, pela presença de uma estação meteorológica móvel na quinta, foi possível avaliar a temperatura média (°C) registada em cada mês, assim como os níveis de precipitação (mm) e a humidade relativa do ar (%) (Tabela 4.1).

**Tabela 4.1-** Médias mensais da temperatura, precipitação e humidade relativa registado na estação móvel presente na Quinta da Leda para o ano 2017.

Quinta da Leda			
	T (°C)	P (mm)	HR (%)
<b>Janeiro</b>	5,3	0,00	82
<b>Fevereiro</b>	10,5	0,02	74
<b>Março</b>	12,4	0,01	67
<b>Abril</b>	16,9	0,00	48
<b>Maio</b>	20,6	0,01	55
<b>Junho</b>	26,1	0,00	42
<b>Julho</b>	26,6	0,00	42
<b>Agosto</b>	26,2	0,01	40
<b>Setembro</b>	22,0	0,00	46

Janeiro foi o mês que registou temperaturas mais baixas, chegando mesmo a atingir temperaturas negativas; os meses de Maio, Junho, Julho e Agosto registaram temperaturas bastante elevada. Durante o ano de 2017, sentiu-se uma seca meteorológica muito severa entre Abril e Dezembro, sendo que se registaram anomalias de precipitação de Abril a Dezembro. A conjugação de valores de precipitação muito inferiores ao normal e elevados valores da temperatura máxima, teve como consequência os altos valores de evapotranspiração e valores significativos de défices de humidade do solo (IPMA, 2017).

A localização da Quinta da Leda combinada com as elevadas temperaturas, défice de precipitação e os ventos fortes sentidos em 2017 podem ter contribuído para a variabilidade dos níveis de ozono. Os padrões temporais da concentração de ozono são apresentados na Figura 4.18.

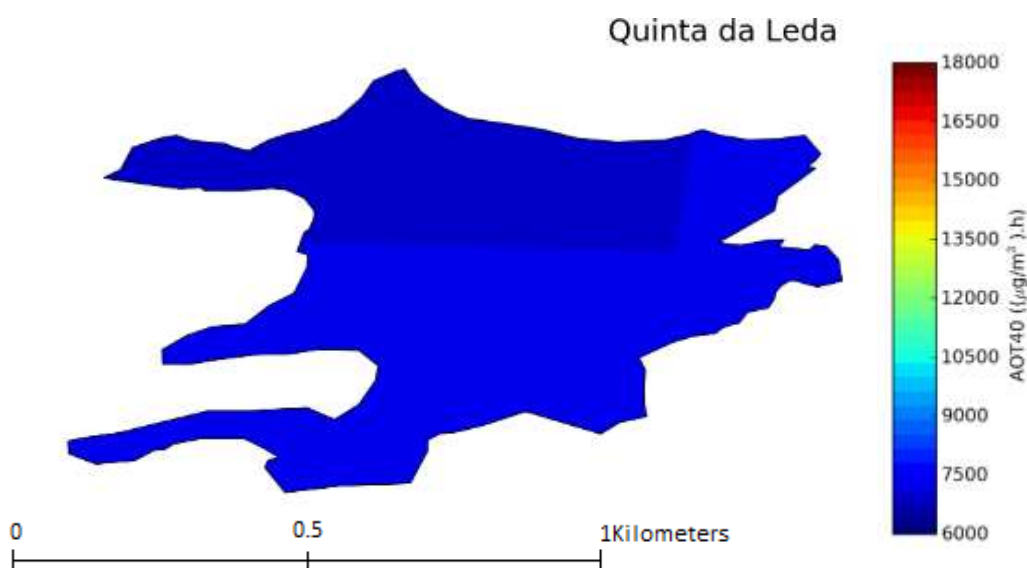


**Figura 4.18-** Série temporal dos valores horários da concentração de  $O_3$ , de Abril a Setembro no ano de 2017, na Quinta da Leda.

Através dos resultados obtidos por modelação e medição verificou-se que as concentrações de ozono seguem um padrão de variação ao longo do dia característico, concordante com outras realidades geográficas. Os níveis de ozono aumentam após nascer-do-sol, atingindo os seus valores mais elevados entre as quatro e as seis horas da tarde, voltando a decrescer durante o período da noite. As concentrações médias horárias de ozono também definem um padrão de variação característico durante as estações do ano, com um contraste claro entre os valores mais elevados de primavera/ verão, principalmente durante Abril a Agosto, e os mais baixos de outono/inverno.

Em geral, as concentrações de ozono na Quinta da Leda variaram entre valores mínimos horários de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  e máximos  $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , os máximos horários de ozono estão associados a situações isoladas que ocorrem próximo do pôr-do-sol, nos meses de verão.

Como já foi referido anteriormente, as normas atuais de proteção dos ecossistemas baseiam-se nas concentrações atmosféricas de ozono, o indicador de exposição AOT40. Para o ano 2017, a Figura 4.19 apresenta os valores de médios de AOT40 por modelação.



**Figura 4.19-** Concentração de ozono em AOT40 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ ), médio, para o ano 2017, calculada para a Quinta da Leda (Domínio 4, a  $1 \times 1 \text{ km}^2$ ).

Para o período vegetativo considerado, Maio a Junho, na Quinta da Leda, em momento algum, foi excedido o valor-alvo para a proteção da vegetação ( $18000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ ), apresentando valores bastante próximos do objetivo que se pretende atingir a longo prazo, ( $6000 \mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{h}$ ). A exposição a médio e longo prazo aos atuais níveis de ozono podem causar danos significativos na vegetação.

Apesar das falhas nos dados monitorizados da concentração de  $\text{O}_3$ , é visível que o CHIMERE consegue representar os níveis mais baixos de ozono, mas falha a estimar os picos de magnitude elevada. A má representação dos valores mais elevados da concentração de ozono por parte do modelo justifica, em parte, os baixos valores do indicador AOT40. Para efetuar o cálculo do indicador o modelo subestima os valores mais elevados de concentração, obtendo valores de AOT40 inferiores ao real.

Por outro lado, os níveis de O<sub>3</sub> variam consideravelmente de ano para ano, com condicionantes meteorológicas e, de acordo com EEA (2017), as emissões primárias e os precursores que contribuem para um aumento da concentração de O<sub>3</sub> na atmosfera diminuíram entre os anos 2000 e 2015 e, em 2014, a área total com culturas agrícolas que excederam o valor legal foi a mais baixa desde o ano 2000, podendo estar-se a verificar uma redução de emissões de gases para a atmosfera que se refletiu nos baixos valores de AOT40 obtidos para a Quinta da Leda em 2017.

Adicionalmente, os valores de AOT40 foram calculados apenas para um ano, enquanto a legislação indica que se aplique este indicador a uma média de 3 a 5 anos para calcular o nível crítico e o valor alvo.

A poluição atmosférica e as alterações climáticas estão diretamente relacionadas com o modo de resposta da vegetação, a diminuição dos valores do indicador de exposição no ano de 2017, em comparação com as médias dos anos 2003, 2004 e 2005, pode não se refletir a longo prazo, sendo necessário avaliar o efeito das alterações climáticas na vegetação num período de tempo mais alargado.

#### **4.4. Ozono e alterações climáticas na Região Demarcada do Douro**

Para a Região Demarcada do Douro, Jones (2013) avaliou as possíveis condições climáticas futura, com recurso a projeções SRES do IPCC do modelo HADCM3 para três cenários de emissões de gases de estufa (B2, A1B e A2) e três períodos futuros (2020, 2050 e 2080). Prevê-se que as temperaturas médias anuais subam gradualmente ao longo dos períodos selecionados. Os níveis de precipitação em clima futuro na RDD tendem a diminuir, uma tendência que se tem registado nos últimos anos.

Estas previsões futuras da alteração do clima podem refletir-se na vegetação característica, nos campos agrícolas e nas vinhas da RDD. O aumento da temperatura irá desencadear um avanço na fenologia da videira, a maturação do bago irá ser precoce, antecipando a sua colheita (van Leeuwen *et al.* (2016).

Como foi anteriormente referido, o sistema de modelação WRF-CHIMERE foi aplicado para o clima presente (2003, 2004, 2005), futuro médio prazo (2049, 2064) e futuro longo prazo (2096, 2097) para estimar a concentração de ozono a região do Douro.

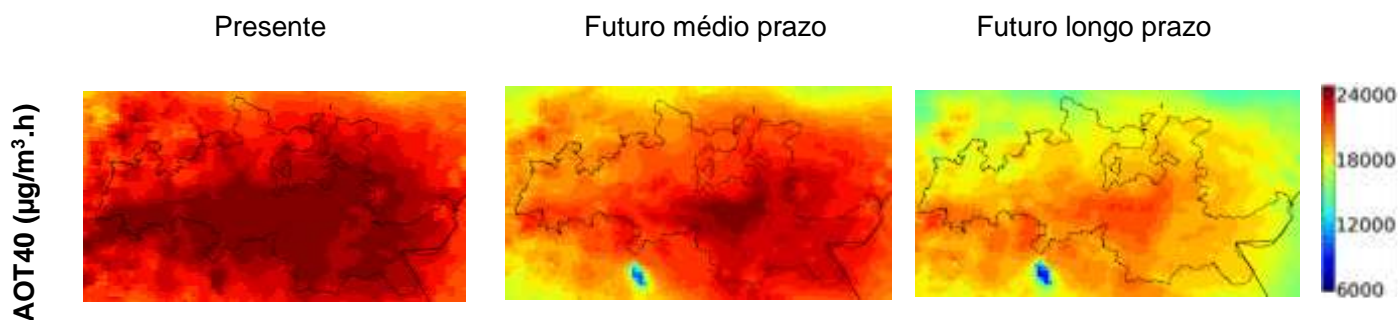
Para avaliar o efeito das alterações climáticas, foi estimada a concentração de ozono considerando que as emissões de precursores ozono se manteriam constante em relação ao clima presente e os valores de emissões projetados para o futuro de acordo com o cenário RCP8.5. Deste modo, foi possível obter uma estimativa dos valores futuros para a  $[O_3]$ , influenciados pela AC e redução de emissões.

A Figura 4.20 apresenta os resultados obtidos por modelação, inclui o clima atual, clima futuro médio e longo prazo onde apenas a AC foi considerada.



**Figura 4.20-** Resultado do modelo numérico para os níveis de AOT40 para clima presente, futuro médio e longo sem emissões futuras.

A Figura 4.21 mostra os resultados das simulações para clima futuro, médio e longo prazo, onde as emissões futuras foram consideradas.



**Figura 4.21-** Resultado do modelo numérico para os níveis de AOT40 para clima futuro médio e longo com emissões futuras.

Considerando a influência da AC, para a RDD, os mapas não apresentam diferenças significativas em relação ao presente num futuro média. Para uma avaliação a longo prazo é possível verificar um aumento médio do indicador AOT40, na ordem dos 2000 µg/m³.h.

Impulsionado pela projeção de emissões, a redução dos níveis de AOT40 é notória, diminuindo cerca de 20% no futuro médio prazo. Para o cenário a longo prazo a redução é significativa, atingindo uma redução na ordem dos 1900 µg/m³.h. Esta redução dos níveis de AOT40 indica que a redução de emissões influenciada o indicador.

Tendo em conta a redução de emissões projetada pelo RCP8.5, esta não é suficiente para atingir o objetivo a longo prazo para a proteção da vegetação (6000 µg/m³.h) estabelecido no Decreto-Lei n.º 102/2010, uma vez que esse valor é excedido em todos os cenários na região do Douro.

#### **4.5. Efeito do ozono troposférico na Região Demarcada do Douro**

O indicador de exposição AOT40, após ser calculado para cada cenário, foi aplicado na avaliação do dano potencial em termos de produtividade e qualidade, através da aplicação e análise das funções de concentração-resposta, obtidas por Soja *et al.* (2004), resultado de um trabalho experimental ao longo três anos sobre os efeitos da exposição a longo prazo das videiras ao ozono. Soja *et al.* (2004), definiram funções para três anos consecutivos, considerando o rendimento da vinha e da produção de açúcar. As equações 5, 6 e 7 representam o efeito exposição-resposta para quantificar o efeito do ozono na produtividade da vinha.

$$\text{Ano 1:} \quad y = 99,3 - 0,355 \text{ AOT40} \quad \text{Eq.(5)}$$

$$\text{Ano 2:} \quad y = 97,3 - 0,266 \text{ AOT40} \quad \text{Eq.(6)}$$

$$\text{Ano 3:} \quad y = 102,4 - 2,614 \text{ AOT40} \quad \text{Eq.(7)}$$

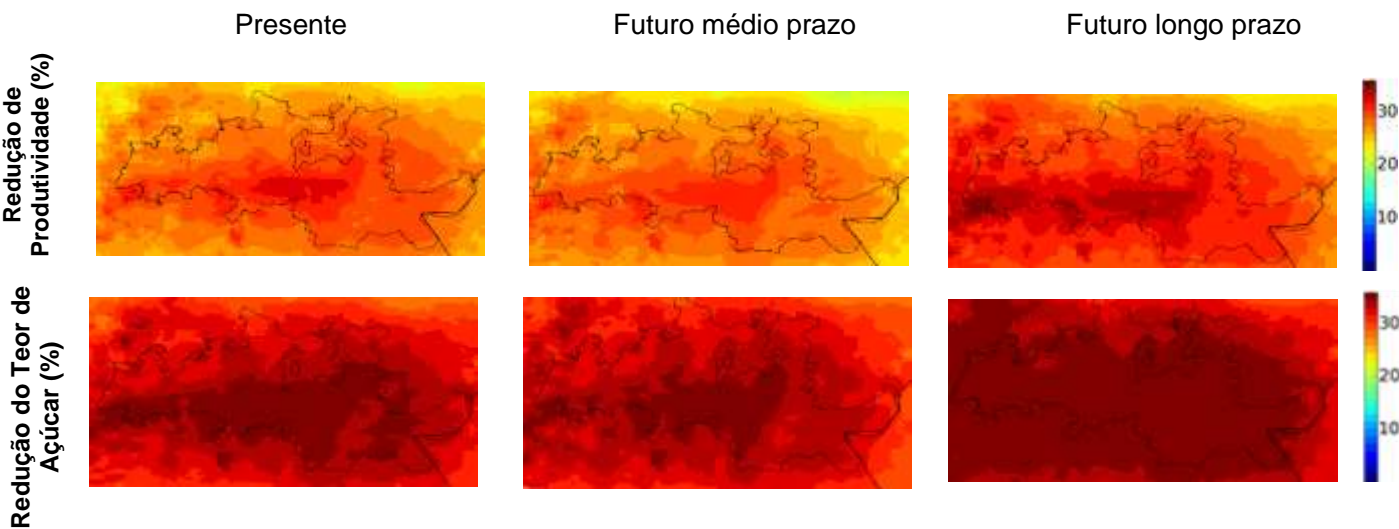
As equações 8, 9 e 10 apresentam as funções que quantificam o efeito do ozono na produção de açúcar.

$$\text{Ano 1:} \quad y = 99,5 - 0,470 \text{ AOT40} \quad \text{Eq.(8)}$$

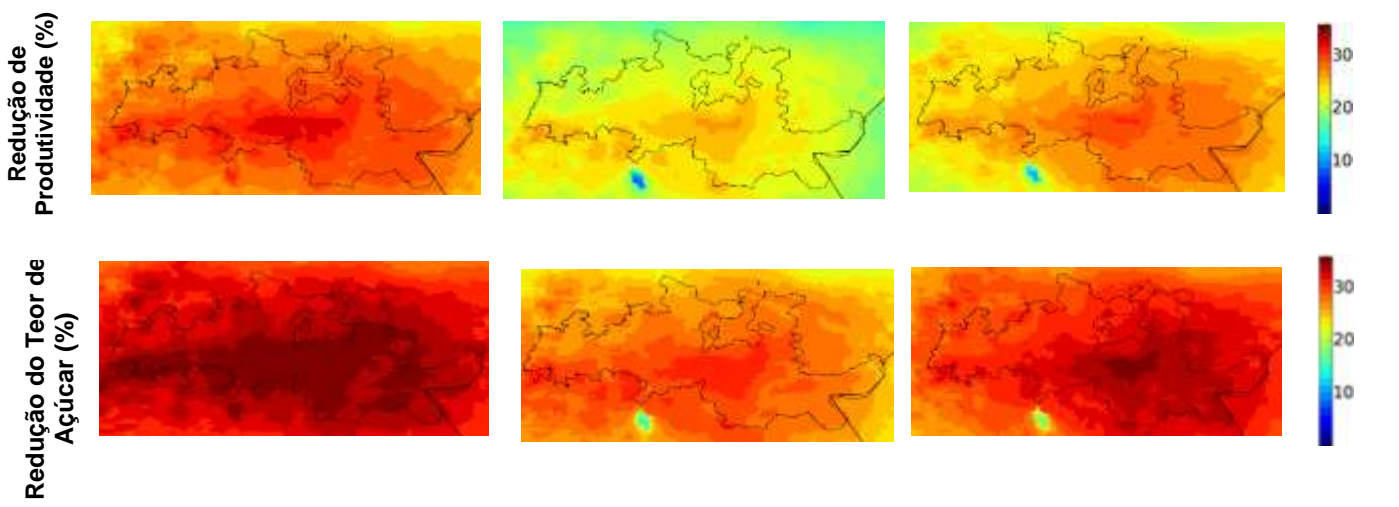
$$\text{Ano 2:} \quad y = 102,8 - 1,323 \text{ AOT40} \quad \text{Eq.(9)}$$

$$\text{Ano 3:} \quad y = 95,4 - 2,456 \text{ AOT40} \quad \text{Eq.(10)}$$

A Figura 4.22 e 4.23 representam os resultados do modelo da produtividade e qualidade (em teor de açúcar) da vinha, para clima futuro médio e longo prazo, sem e com emissões.



**Figura 4.22**-Resultado do modelo numérico de redução de produtividade e qualidade para clima presente, futuro médio e longo sem emissões futuras.



**Figura 4.23**-Resultado do modelo numérico de redução de produtividade e qualidade para clima presente, futuro médio e longo com emissões futuras.

No cenário de clima presente o valor da perda de produtividade e qualidade, em termos médios é cerca de 30%. Numa avaliação do clima futuro a médio prazo, considerando a AC, a redução de perda produtividade e qualidade não é significativa, cerca de 1%. Introduzindo as emissões projetadas para o mesmo cenário temporal, a redução da perda produtividade e qualidade será 7%, aproximadamente.

A longo prazo, não considerando as emissões futuras, o aumento dos níveis de AOT40 traduz-se num aumento de 10% na perda de produtividade e qualidade. Considerando as emissões futuras, a diminuição será de 9% e 8%, respetivamente.

De acordo com Fraga *et al.* (2014), o aumento da temperatura na Região do Douro pode levar à diminuição da produção vinícola ou ao aparecimento de locais em que as condições sejam inadequadas para a viticultura. O efeito combinado do aumento da temperatura e da seca extrema dos solos pode provocar danos tanto nas videiras como nas uvas. Do mesmo modo, as elevadas temperaturas que se podem vir a sentir nos períodos noturnos e a consequente diminuição da amplitude térmica, nos últimos estágios de desenvolvimento da uva, podem reduzir a qualidade do vinho.

É necessário ter em conta que a aplicação das funções determinadas por Soja *et al.* (2004) estão associadas a fontes de incerteza: (i) Touriga Nacional e Touriga Franca são as castas mais comuns na RDD, Soja *et al.* (2004) utilizou outro tipo de videira logo as funções dose-resposta e exposição-resposta não são adequadas; (ii) as videiras utilizadas foram pré-cultivadas durante dois anos em clima continental ao que nada se assemelha com a região Douro; (iii) durante dois anos as plantas permaneceram num ambiente controlado não tendo em conta a influência das condições meteorológicas e de humidade do solo.



## 5. Conclusão e trabalho futuro

O presente trabalho teve como objetivo estimar, recorrendo ao modelo numérico CHIMERE, as concentrações de ozono troposférico na Região Demarcada do Douro, em clima presente e futuro, de modo a avaliar o risco de exposição das vinhas do Douro ao ozono.

Foi possível obter mapas de risco calculados com base no indicador de exposição AOT40 para o clima presente (2003, 2004, 2005). Os resultados indicam que o valor-alvo para a proteção da vegetação foi excedido nas quintas associadas ao projeto DOUROZONO, assim como em toda a área da RDD, podendo o ozono estar a provocar danos diretos nas vinhas e potencialmente a diminuir o seu rendimento e qualidade. Pela avaliação das características das seis quintas foi possível concluir que as quintas que se encontram mais elevadas apresentam maior valor de concentração de ozono, como era esperado. Contudo é necessário ter em conta que o indicador AOT40 corresponde à exposição cumulativa suscetível de causar efeitos na vegetação rasteira e culturas agrícolas que se encontram nas quintas, podendo o valor do indicador de exposição ser mais elevado e não refletir a realidade.

No ano de 2017, os resultados do modelo para níveis de AOT40, na Quinta da Leda, em nada se assemelharam aos simulados para o ano de 2003, 2004 e 2005. No passado verão o indicador de exposição não ultrapassando o valor-alvo para a proteção da vegetação ( $18000 \text{ } (\mu\text{g}/\text{m}^3)\cdot\text{h}$ ) apresentando valores próximos do objetivo a longo prazo.

No que se refere ao clima futuro, médio e longo prazo, considerando as emissões futuras, os resultados do modelo apontam para uma diminuição dos níveis de AOT40 na Região Demarcada do Douro. No entanto, a redução demonstrada por modelação não é suficiente para atingir o objetivo a longo prazo para a proteção da vegetação, estabelecido no Decreto-Lei 102/2010 de 23 de Setembro, uma vez que esse valor é excedido em toda a região.

Por aplicação das funções exposição-resposta de Soja *et al.* (2004), foi possível estimar potencial impacto da exposição ao ozono na produtividade e na qualidade. Com base nos resultados do modelo, para um cenário a longo prazo considerando apenas a AC, a perda de produtividade e qualidade da vinha pode ser de 10%, quando expostas a elevadas concentrações de AOT40.

Futuramente, para uma abordagem baseada no indicador AOT40 e na estimativa dos valores de produtividade e teores de açúcar, devem utilizar-se funções semelhantes às de Soja *et al.* (2004), mas desenvolvidas para castas mais similares às existentes na região do Douro. Deve também assentar em valores relativos ao fluxo-estomacal, aplicando o indicador  $\text{POD}_Y$ .



# Referências

- Afonso, P. A. F. (2014). **Concentrações de ozono superficial em Portugal: Avaliação dos padrões temporais e dos contrastes espaciais em estações de fundo**. Instituto Politécnico de Bragança. Retrieved from [https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/11789/1/Tese Final.pdf](https://bibliotecadigital.ipb.pt/bitstream/10198/11789/1/Tese%20Final.pdf)
- Agência Portuguesa do Ambiente. (2008). **Evolução da qualidade do ar em Portugal entre 2001 e 2005**. Amadora. Retrieved from [https://www.apambiente.pt/\\_zdata/DAR/Evolucao\\_qualidade\\_ar\\_Portugal\\_2001\\_2005.pdf](https://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Evolucao_qualidade_ar_Portugal_2001_2005.pdf)
- Ainsworth, E. A., Yendrek, C. R., Sitch, S., Collins, W. J., & Emberson, L. D. (2012). **The Effects of Tropospheric Ozone on Net Primary Productivity and Implications for Climate Change**. *Annual Review of Plant Biology*, 63(1), 637–661. <https://doi.org/10.1146/annurev-arplant-042110-103829>
- Almeida, C. A. B. de. (2006). **História do Douro e do Vinho do Porto. Vol. 1: História Antiga da Região Duriense**. Porto: Edições Afrontameneto.
- Anav, A., De Marco, A., Proietti, C., Alessandri, A., Dell'Aquila, A., Cionni, I., ... Vitale, M. (2016). **Comparing concentration-based (AOT40) and stomatal uptake (PODY) metrics for ozone risk assessment to European forests**. *Global Change Biology*, 22(4), 1608–1627. <https://doi.org/10.1111/gcb.13138>
- Ascenso, A. F. I. (2017). **Avaliação da exposição da vinha duriense ao ozono troposférico**. Dissertação de Mestrado. Univerisdade de Aveiro. Retrieved from <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/23345/1/dissertacao.pdf>
- Ashmore M., Emberson L., Karlsson P.E., P. H. (2004). **New Directions: A new generation of ozone critical levels for the protection of vegetation in Europe**. *Atmospheric Environment*, 38, 2213–2214. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.02.029>
- Ashmore, M. R. (2005). **Assessing the future global impacts of ozone on vegetation**. *Plant, Cell and Environment*, 28(8), 949–964. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2005.01341.x>
- Avnery, S., Mauzerall, D. L., Liu, J., & Horowitz, L. W. (2011). **Global crop yield reductions due to surface ozone exposure: 1. Year 2000 crop production losses and economic damage**. *Atmospheric Environment*, 45(13), 2284–2296. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2010.11.045>
- Blanco-Ward, D., Monteiro, A., Lopes, M., Borrego, C., Silveira, C., Viceto, C., ... Miranda, A. (2017).

- Analysis of climate change indices in relation to wine production: A case study in the Douro region (Portugal).** *BIO Web of Conferences*, 9, 01011. <https://doi.org/10.1051/bioconf/20170901011>
- Booker, F., Muntifering, R., Mcgrath, M., Burkey, K., Decoteau, D., Fiscus, E., Grantz, D. (2009). **The Ozone Component of Global Change: Potential Effects on Agricultural and Horticultural Plant Yield, Product Quality and Interactions with Invasive Species.** *Journal of Integrative Plant Biology J. Integr. Plant Biol*, 51(514), 337–351. <https://doi.org/10.1111/j.1744-7909.2008.00805.x>
- Castro, A. (2013). **Aplicação de cinco índices bioclimáticos a algumas castas da Região de Vinho do Porto- Estudo de caso em nove estações climatológicas.** Dissertação de Mestrado. *Faculdade de Letras da Universidade do Porto*. Faculdade de Letras da Universidade do Porto, Porto. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10216/72168>
- Chappelka, A., Renfro, J., Somers, G., & Nash, B. (1997). **Evaluation of ozone injury on foliage of black cherry (*Prunus serotina*) and tall milkweed (*Asclepias exaltata*) in Great Smoky Mountains National Park.** *Environmental Pollution (Barking, Essex : 1987)*, 95(1), 13–18. Retrieved from <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15093469>
- Chevalier, A., Gheusi, F., Delmas, R., Ordóñez, C., Sarrat, C., Zbinden, R., ... Cousin, J.-M. (2007). **Influence of altitude on ozone levels and variability in the lower troposphere: a ground-based study for western Europe over the period 2001&ndash;2004.** *Atmospheric Chemistry and Physics*, 7(16), 4311–4326. <https://doi.org/10.5194/acp-7-4311-2007>
- Decreto-Lei n.º 102/2010 de de 23 de Setembro do Ministério do Ambiente e do Ordenamento do Território**, Pub. L. No. Diário da República, 1.ª série — N.º 186 (2010). Portugal. Retrieved from <https://dre.pt/application/dir/pdf1sdip/2010/09/18600/0417704205.pdf>
- Direção Geral do Ambiente (DGA). (2001). **Campanhas para a Avaliação Preliminar da Qualidade do Ar em Portugal – NO 2 e SO 2 – Tubos de Difusão.** Alfragide.
- Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe**, Pub. L. No. EUROPEAN PARLIAMENT, CONCIL OF THE EUROPEAN UNION, 1 (2008). Official Journal of the European Communities.
- Emberson, L. D., Ashmore, M. R., Cambridge, H. M., Simpson, D., & Tuovinen, J.-P. (2000). **Modelling stomatal ozone flux across Europe.** *Environmental Pollution*, 109(3), 403–413. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(00\)00043-9](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(00)00043-9)
- European Enviornment Agency (EEA). (2006). **Air pollution by ozone in Europe in summer 2005.** Copenhagen. Retrieved from <http://www.pedz.uni-mannheim.de/daten/edz->

bn/eua/06/technical\_rep\_3\_2006.pdf

European Environment Agency (EEA). (2014). **Air quality in Europe — 2016 report**. Copenhagen: Luxembourg: Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2800/2277>

European Environment Agency (EEA). (2017). **Air quality in Europe — 2017 report**. Copenhagen. <https://doi.org/10.2800/850018>

Feliciano, M. J. S. (2001). **Parametrização, Deposição Seca de Poluentes Gasoso em Ecossistemas do Sul da Europa: Medição e Parametrização**. Universidade de Aveiro.

Feng, Z., Kobayashi, K., & Ainsworth, E. A. (2008). **Impact of elevated ozone concentration on growth, physiology, and yield of wheat (Triticum aestivum L.): a meta-analysis**. *Global Change Biology*, 14(11). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01673.x>

Ferreira, F., Nogueira, L., Almeida, C., Tente, H., Martins, A., Monjardino, J., ... Torres, P. (2016). **Planos e Programas para a melhoria da qualidade do ar na Região de Lisboa e Vale do Tejo**.

Forster, P., Ramaswamy, V., Artaxo, P., Bernsten, T., Betts, R., Fahey, D. W., ... Van, R. (2007). **Changes in Atmospheric Constituents and in Radiative Forcing Chapter 2. Netherlands) G. Bodeker (New Zealand) Climate Change**. Retrieved from <https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-chapter2.pdf>

Fraga, H., Malheiro, A. C., Moutinho-Pereira, J., Jones, G. V., Alves, F., Pinto, J. G., & Santos, J. A. (2014). **Very high resolution bioclimatic zoning of Portuguese wine regions: present and future scenarios**. *Regional Environmental Change*, 14(1), 295–306. <https://doi.org/10.1007/s10113-013-0490-y>

Fuhrer, J. (2009). **Ozone risk for crops and pastures in present and future climates**. *Naturwissenschaften*, 96(2), 173–194. <https://doi.org/10.1007/s00114-008-0468-7>

Fuhrer, J., & Booker, F. (2003). **Ecological issues related to ozone: agricultural issues**. *Environment International*, 29(2–3), 141–154. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(02\)00157-5](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(02)00157-5)

Fuhrer, J., Skärby, L., & Ashmore, M. R. (1997). **Critical levels for ozone effects on vegetation in Europe**. *Environmental Pollution*, 97(1–2), 91–106. [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(97\)00067-5](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(97)00067-5)

Fumagalli, I., Gimeno, B. S., Velissariou, D., De Temmerman, L., & Mills, G. (2001). **Evidence of ozone-induced adverse effects on crops in the Mediterranean region**. *Atmospheric*

- Environment*, 35(14), 2583–2587. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00468-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00468-4)
- Grantz, D. A., Zhang, X. J., Massman, W. J., Den Hartog, G., Neumann, H. H., & Pederson, J. R. (1995). **Effects of stomatal conductance and surface wetness on ozone deposition in field-grown grape.** *Atmospheric Environment*, 29(21), 3189–3198. [https://doi.org/10.1016/1352-2310\(95\)00129-M](https://doi.org/10.1016/1352-2310(95)00129-M)
- Hayes, F., Mills, G., Harmens, H., & Norris, D. (2007). **Evidence of widespread ozone damage to vegetation in Europe (1990-2006).** United Kingdom. Retrieved from <https://icpvegetation.ceh.ac.uk/research/documents/EvidenceReportFINALPRINTEDVERSIONlow-res.pdf>
- Institudos dos Vinhos do Douro e Porto (IVDP). (2004). **Viticultura e Região.** Retrieved April 5, 2018, from <https://www.ivdp.pt/pagina.asp?codPag=16>
- Instituto da Vinha e do Vinho (IVV). (2016). **Anuário 2016: Vinhos e Aguardentes de Portugal.** (M. J.-P. Fernão, Ed.). Lisboa: Enigma Editores. Retrieved from [http://www.ivv.gov.pt/np4/%7B\\$clientServletPath%7D/?newsId=1736&fileName=IVV2017\\_WEB.PDF](http://www.ivv.gov.pt/np4/%7B$clientServletPath%7D/?newsId=1736&fileName=IVV2017_WEB.PDF)
- Instituto do Ambiente, FCT/UNL, C. (2004). **PTEN: Cenário de Cumprimento da Diretiva 2001/01/CE.** Lisboa.
- Instituto de Meteorologia (IM). (2003). **Caracterização Climática - 2003.** Lisboa. Retrieved from [https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20081014/rXHkGiXtgviFLDxwiFKT/cli\\_20030101\\_20031231\\_pcl\\_aa\\_co\\_pt.pdf](https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20081014/rXHkGiXtgviFLDxwiFKT/cli_20030101_20031231_pcl_aa_co_pt.pdf)
- Instituto de Meteorologia (IM). (2004). **Caracterização Climática - 2004.** Lisboa. Retrieved from [https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20140903/NrWhllgTddpLNJlybpiM/cli\\_20040101\\_20041231\\_pcl\\_aa\\_co\\_pt.pdf](https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20140903/NrWhllgTddpLNJlybpiM/cli_20040101_20041231_pcl_aa_co_pt.pdf)
- Instituto de Meteorologia (IM). (2005). **Caracterização Climática- 2005.** Retrieved from [https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20081014/KZcwnQrfVHeUZOaTzltth/cli\\_20050101\\_20051231\\_pcl\\_aa\\_co\\_pt.pdf](https://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20081014/KZcwnQrfVHeUZOaTzltth/cli_20050101_20051231_pcl_aa_co_pt.pdf)
- Instituto Nacional de Estatística (INE). (2017). **Previsões Agrícolas. Destaque: Informação à Comunicação Social,** pp. 1–8. Retrieved from [https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine\\_destaques&DESTAQUESdest\\_boui=281413857&DESTAQUESmodo=2&xlang=pt](https://www.ine.pt/xportal/xmain?xpid=INE&xpgid=ine_destaques&DESTAQUESdest_boui=281413857&DESTAQUESmodo=2&xlang=pt)
- Instituto Português do Mar e da Atmosfera (IPMA). (2017). **Boletim Climatológico Anual Portugal Continental 2017.** Lisboa. Retrieved from

[http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20180323/cHAXzjMhUzLfdgCRJIKG/cli\\_20171201\\_20171231\\_pcl\\_aa\\_co\\_pt.pdf](http://www.ipma.pt/resources.www/docs/im.publicacoes/edicoes.online/20180323/cHAXzjMhUzLfdgCRJIKG/cli_20171201_20171231_pcl_aa_co_pt.pdf)

Jones, G. (2013). **Uma Avaliação do Clima para a Região Demarcada do Douro : Uma análise das condições climáticas do passado , presente e futuro para a produção de vinho (ADVID-Ass)**. Retrieved from <http://www.advid.pt/imagens/outros/13790697133655.pdf>

Jones, G. V., & Alves, F. (2012). **Impact of climate change on wine production: a global overview and regional assessment in the Douro Valley of Portugal**. *International Journal of Global Warming*, 4(3/4), 383. <https://doi.org/10.1504/IJGW.2012.049448>

Kangasjarvi, J., Talvinen, J., Utriainen, M., & Karjalainen, R. (1994). **Plant defence systems induced by ozone**. *Plant, Cell and Environment*, 17(7), 783–794. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1994.tb00173.x>

Kickert, R. N., & Krupa, S. V. (1990). **Forest responses to tropospheric ozone and global climate change: An analysis**. *Environmental Pollution*, 68(1–2), 29–65. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(90\)90012-2](https://doi.org/10.1016/0269-7491(90)90012-2)

Klingberg, J., Engardt, M., Uddling, J., Karlsson, P. E., & Pleijel, H. (2011). **Ozone risk for vegetation in the future climate of Europe based on stomatal ozone uptake calculations**. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 63(1), 174–187. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00465.x>

Krupa, S., McGrath, M. T., Andersen, C. P., Booker, F. L., Burkey, K. O., Chappelka, A. H., ... Zilinskas, B. A. (2001). **Ambient Ozone and Plant Health**. *Plant Disease*, 85(1), 4–12. <https://doi.org/10.1094/PDIS.2001.85.1.4>

Krupa, S. V., & Manning, W. J. (1988). **Atmospheric ozone: Formation and effects on vegetation**. *Environmental Pollution*, 50(1–2), 101–137. [https://doi.org/10.1016/0269-7491\(88\)90187-X](https://doi.org/10.1016/0269-7491(88)90187-X)

LMD, INERIS, L. (2016). **Documentation of the chemistry-transport model - CHIMERE [version chimere 2016a]**. Retrieved from <http://www.lmd.polytechnique.fr/chimere/>

Lopes, C. S. R. (2013). **Impacte do ozono troposférico no Parque Natural do Alvão: estudo do efeito fitotóxico e de marcadores genéticos em plantas sensíveis e tolerantes de *Nicotiana tabacum***. Dissertação de Mestrado. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Retrieved from [https://www.openaire.eu/search/find?format=raw&publicationId=od\\_\\_\\_\\_\\_1628::97b8c8163e63f51f3b6998519b6426f8&view=printpublication](https://www.openaire.eu/search/find?format=raw&publicationId=od_____1628::97b8c8163e63f51f3b6998519b6426f8&view=printpublication)

Lopes Ribeiro, C. I. (2005). **Aplicação de um Modelo Meteorológico e de Qualidade do Ar a**

- Portugal.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro. Retrieved from <https://ria.ua.pt/bitstream/10773/15249/1/Tese.pdf>
- Machado, C. I. da S. (2010). **Vulnerabilidade da Região Demarcada do Douro às alterações climáticas e efeitos sobre o ciclo vegetativo da videira : o caso do Moscatel Galego.** Dissertação de Mestrado. Universidade do Minho. Retrieved from <http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/19773>
- Maciel, Â. M. P. G. (2005). **A Pertinência dos Estudos de Microclimatologia para a Prevenção dos Riscos Climáticos num Vinhedo do “Entre Douro e Minho.”** Dissertação de Mestrado Faculdade de Letras da Universidade do Porto. Retrieved from <https://repositorio-aberto.up.pt/handle/10216/15250>
- Magalhães, N. (2012). **Manual de Boas Práticas Vitícolas na Região Demarcada do Douro.** Retrieved from [http://www.ccdr-n.pt/sites/default/files/ficheiros\\_ccdrn/missaodouro/suvidur\\_pt.pdf](http://www.ccdr-n.pt/sites/default/files/ficheiros_ccdrn/missaodouro/suvidur_pt.pdf)
- Marta-Almeida, M., Teixeira, J. C., Carvalho, M. J., Melo-Gonçalves, P., & Rocha, A. M. (2016). **High resolution WRF climatic simulations for the Iberian Peninsula: Model validation.** *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C*, 94, 94–105. <https://doi.org/10.1016/J.PCE.2016.03.010>
- Mauzerall, D. L., & Wang, X. (2001). **Protecting Agricultural Crops From the Effects of Tropospheric Ozone ExposurePOSURE : Reconciling Science and Standard Setting in the United States, Europe, and Asia.** *Annual Review of Energy and the Environment*, 26(1), 237–268. <https://doi.org/10.1146/annurev.energy.26.1.237>
- Monteiro, M. A. (2007). **Desenvolvimento de um sistema de avaliação e previsão da qualidade do ar para Portugal.** Tese de Doutoramento. Univerisdade de Aveiro. Retrieved from <http://hdl.handle.net/10773/698>
- Musselman RC, Forsline PL, Kender WJ (1985) **Effects of sulfur dioxide and ambient ozone on Concord grapevine growth and productivity.** *J Am Soc Hortic Sci* 110: 882-888
- Musselman, R. C., Lefohn, A. S., Massman, W. J., & Heath, R. L. (2006). **A critical review and analysis of the use of exposure-and flux-based ozone indices for predicting vegetation effects.** *Atmospheric Environment*, 40, 1869–1888. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.10.064>
- Paoletti, E., & Manning, W. J. (2007). **Toward a biologically significant and usable standard for ozone that will also protect plants.** *Environmental Pollution*, 150(1), 85–95. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2007.06.037>



- Pasqualini, S., Batini, P., Ederli, L., Porceddu, A., Piccioni, C., De Marchis, F., & Antonielli, M. (2001). **Effects of short-term ozone fumigation on tobacco plants: response of the scavenging system and expression of the glutathione reductase.** *Plant, Cell and Environment*, 24(2), 245–252. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.2001.00671.x>
- Pellegrini, E., Campanella, A., Paolocci, M., Trivellini, A., Gennai, C., Muganu, M., ... Lorenzini, G. (2015). **Functional Leaf Traits and Diurnal Dynamics of Photosynthetic Parameters Predict the Behavior of Grapevine Varieties Towards Ozone.** *PLOS ONE*, 10(8), e0135056. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0135056>
- Pell, -Eva J., Schlaghaufer, C. D., & Arteca, R. N. (1997). **Ozone-induced oxidative stress: Mechanisms of action and reaction.** *Physiologia Plantarum*, 100(2), 264–273. <https://doi.org/10.1111/j.1399-3054.1997.tb04782.x>
- Pereira, G. M. (2005). **O Vinho do Porto: entre o artesanato e a agroindústria.** *Revista da Faculdade de Letras* (Vol. 6). Porto. Retrieved from <http://ler.letras.up.pt/uploads/ficheiros/3383.pdf>
- Pereira, J. M. M. (2000). **Caracterização fisiológica e agronómica de diferentes estratégias culturais para minimizar o stress estival em vitis vinífera L. na Região Demarcada do Douro.** Tese de Doutoramento. Universidade de Trás-os-Montes e Alto Douro. Retrieved from <https://repositorio.utad.pt/handle/10348/38?locale=en>
- Pereira, S. C., Marta-Almeida, M., Carvalho, A. C., & Rocha, A. (2017). **Heat wave and cold spell changes in Iberia for a future climate scenario.** *International Journal of Climatology*, 37(15), 5192–5205. <https://doi.org/10.1002/joc.5158>
- Pleijel, H., Danielsson, H., Emberson, L., Ashmore, M. R., & Mills, G. (2007). **Ozone risk assessment for agricultural crops in Europe: Further development of stomatal flux and flux–response relationships for European wheat and potato.** *Atmospheric Environment*, 41(14), 3022–3040. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2006.12.002>
- Reid, N., Misra, P. K., Amman, M., & Hales, J. (2007). **Air Quality Modeling for Policy Development.** *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A*, 70(3–4), 295–310. <https://doi.org/10.1080/15287390600884933>
- Reis, L. A. da S. (2008). **Modelos estatísticos de previsão do ozono troposférico na região de Lisboa e Vale do Tejo.** Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa. Retrieved from [https://run.unl.pt/bitstream/10362/1395/1/Reis\\_2008.pdf](https://run.unl.pt/bitstream/10362/1395/1/Reis_2008.pdf)
- Roper, T. R., & Williams, L. E. (1989). **Effects of Ambient and Acute Partial Pressures of Ozone on Leaf Net CO<sub>2</sub> Assimilation of Field-Grown Vitis vinífera L.** *Plant Physiology*, 91(4),

- 1501–1506. <https://doi.org/10.1104/PP.91.4.1501>
- Saitanis, C. J. (2003). **Background ozone monitoring and phytodetection in the greater rural area of Corinth—Greece.** *Chemosphere*, 51(9), 913–923. [https://doi.org/10.1016/S0045-6535\(03\)00041-9](https://doi.org/10.1016/S0045-6535(03)00041-9)
- Sander mann, H. (1998). **Ozone: An Air Pollutant Acting as a Plant-Signaling Molecule.** *Naturwissenschaften*, 85, 369–375. Retrieved from <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s001140050518.pdf>
- Sander mann Jr, H. (1996). **OZONE AND PLANT HEALTH.** *Annual Review of Phytopathology*, 34(1), 347–366. <https://doi.org/10.1146/annurev.phyto.34.1.347>
- Santos, J. A., Grätsch, S. D., Karremann, M. K., Jones, G. V., & Pinto, J. G. (2013). **Ensemble projections for wine production in the Douro Valley of Portugal.** *Climatic Change*, 117(1–2), 211–225. <https://doi.org/10.1007/s10584-012-0538-x>
- Schmidt, H., Derognat, C., Vautard, R., & Beekmann, M. (2001). **A comparison of simulated and observed ozone mixing ratios for the summer of 1998 in Western Europe.** *Atmospheric Environment*, 35(36), 6277–6297. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(01\)00451-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(01)00451-4)
- Silva, C. M. dos S. G. da. (2008). **Ozono no nordeste transmontano : problema local ou regional?** Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro. Retrieved from <http://ria.ua.pt/handle/10773/536>
- Simpson, D., Ashmore, M. R., Emberson, L., & Tuovinen, J.-P. (2007). **A comparison of two different approaches for mapping potential ozone damage to vegetation. A model study.** *Environmental Pollution*, 146(3), 715–725. <https://doi.org/10.1016/J.ENVPOL.2006.04.013>
- Soja, G., Reichenauer, T. G., Eid, M., Soja, A.-M., Schaber, R., & Gangl, H. (2004). **Long-term ozone exposure and ozone uptake of grapevines in open-top chambers.** *Atmospheric Environment*, 38(15), 2313–2321. <https://doi.org/10.1016/J.ATMOENV.2003.12.038>
- The Royal Society. (2008). **Ground-level ozone in the 21st century: future trends, impacts and policy implications.** October. London: Science Policy. Retrieved from [https://royalsociety.org/~media/Royal\\_Society\\_Content/policy/publications/2008/7925.pdf](https://royalsociety.org/~media/Royal_Society_Content/policy/publications/2008/7925.pdf)
- U.S. EPA. (2006a). **Air Quality Criteria for Ozone and Related Photochemical Oxidants Volume I of III. Molecular and cellular biochemistry** (Vol. 1). Washington, DC, USA. <https://doi.org/EPA/600/R-05/004aF>
- UNECE. (2004). **Manual on methodologies and criteria for Modelling and Mapping Critical**

**Loads & Levels and Air Pollution Effects, Risks and Trends.** (H.-D. G. Spranger, Till, Ullrich Lorenz, Ed.). Berlim: Federal Environmental Agency. Retrieved from <http://www.umweltbundesamt.de>

Valinhas, M. J. da C. M. (2000). **Modelação da deposição de poluentes atmosféricos : aplicação ao conceito de cargas críticas.** Universidade de Aveiro. Retrieved from <https://ria.ua.pt/handle/10773/15373>

van Leeuwen, C., & Darriet, P. (2016). **The Impact of Climate Change on Viticulture and Wine Quality.** *Journal of Wine Economics*, 11(01), 150–167. <https://doi.org/10.1017/jwe.2015.21>

Vandermeiren, K., Harmens, H., Mills, G., & De Temmerman, L. (2009). **Impacts of Ground-Level Ozone on Crop Production in a Changing Climate** (pp. 213–243). [https://doi.org/10.1007/978-3-540-88246-6\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-540-88246-6_10)